

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VYUŽITÍ SÍŤE WLAN PRO DETEKCI LIDSKÉ AKTIVITY UVNITŘ BUDOV

HUMAN ACTIVITY DETECTION IN INDOOR SPACES VIA WLAN NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Sekanina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Miloš, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Tomáš Sekanina

ID: 195430

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Využití sítě WLAN pro detekci lidské aktivity uvnitř budov

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce detailně prostudujte vlastnosti fyzické vrstvy bezdrátového komunikačního standardu IEEE 802.11n. Zaměřte se především na metody odhadu kanálu a kvality spojení. Seznamte se s vlastnostmi a použitím Wi-Fi karty INTEL 5300 NIC a dostupného nástroje CSI tool. Provedte měření odhadu kanálu v místnosti prostřednictvím Wi-Fi karty, exportujte výsledky a proveďte jejich analýzu.

V experimentální části práce navrhnete různé měřicí scénáře v místnosti a proveďte detailní měření. Zvažte možnost využití odhadu kanálu WLAN pro medicínské aplikace. Získané poznatky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] IEEE STD 802.11-2012. IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks— Specific requirements: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. V1. New York, NY, USA: IEEE Computer Society, 2012.

[2] D. HALPERIN, W. HU, A. SHETH, D. WETHERALL. Tool release: Gathering 802.11n Traces with Channel State Information. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. vol. 41, no. 1, pp. 53-53, 2011. ISSN: 01464833.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 23.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jiří Miloš, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce představuje možnosti využití sítě WLAN a bezdrátový komunikační standard IEEE 802.11n na detekci objektů nebo lidské aktivity v místnosti pro různé měřicí scénáře. Práce obsahuje teoretický popis sítě WLAN a rodiny standardů IEEE 802.11 s detailním zaměřením na standard IEEE 802.11n, respektive na jeho fyzickou vrstvu. Určitá pozornost je tu věnována i popisu šíření vln uvnitř budov. Dále popis měřicí Wi-Fi karty INTEL 5300, nástroje CSI Tool 802.11n a ovládání měřicí karty v prostředí Linux. V praktické části je demonstrována analýza paketů přenášených pomocí standardu 802.11n v módu vysoké propustnosti. Výsledky měření detekce objektů a aktivity v místnosti jsou exportovány do programového prostředí MATLAB, kde jsou analyzovány. Výsledky experimentů jsou diskutovány v závěru.

KLÍČOVÁ SLOVA

WLAN, IEEE 802.11n, CSI, MATLAB, fyzická vrstva, zpracování signálů, Wi-Fi karta INTEL 5300, Linux

ABSTRACT

Bachelor thesis represents possibilities of use WLAN network and standard IEEE 802.11n for object or human detection in a room with different scenarios. Bachelor thesis includes a theoretical description of WLAN network and family of WLAN standards IEEE 802.11 with detailed focus on standard IEEE 802.11n and its physical layer. Attention is also paid to the wave propagation inside buildings. It also includes description of measuring Wi-Fi INTEL 5300 NIC, CSI Tool 802.11n and controlling measuring NIC in operating system Linux. In practical part is demonstrated analysis of high-throughput packets using standard 802.11n. Results of measurement of object and human detection in a room are exported to programming language MATLAB and there are analyzed. Results of experiments are discussed in conclusion of bachelor thesis.

KEYWORDS

WLAN, IEEE 802.11n, CSI, MATLAB, physical layer (PHY), signal processing, Wi-Fi INTEL 5300 NIC, Linux

SEKANINA, Tomáš. *Využití sítě WLAN pro detekci lidské aktivity uvnitř budov*. Brno, 2019, 61 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Jiří Miloš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Využití sítě WLAN pro detekci lidské aktivity uvnitř budov“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Milošovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	10
1 Standard IEEE 802.11	11
1.1 Přehled vydaných standardů	11
1.2 Modulační techniky IEEE 802.11	15
1.2.1 Rozprostřené frekvenční spektrum	15
1.2.2 Ortogonální multiplex (OFDM)	15
1.3 IEEE 802.11n	18
1.3.1 IEEE 802.11n - fyzická vrstva (PHY)	19
1.4 Channel State Information (CSI)	23
2 Šíření vln uvnitř budov	25
2.1 Šíření vln	25
2.2 Signál v přenosovém kanálu	27
2.3 Klasifikace šíření vln dle typu prostředí v zástavbě	29
3 CSI Tool 802.11n	30
3.1 Nastavení a možnosti nástroje CSI Tool	30
3.1.1 Základní Instalace	31
3.1.2 Omezení nástroje	32
3.2 Dosažitelné charakteristiky a výstupy	32
3.2.1 Dostupné informace o přenosovém kanálu	32
3.2.2 Analýza CSI ve frekvenční a časové oblasti	33
3.2.3 SNR	35
4 Měření kanálu v místnosti	36
4.1 Konfigurace routeru	36
4.2 Statické měření kanálu	37
4.2.1 Měření při přímé viditelnosti	38
4.2.2 Měření při nepřímé viditelnosti	40
4.2.3 Srovnání dosažených výsledků	42
4.3 Dynamické měření kanálu	43
4.3.1 Měření při přímé viditelnosti	44
4.3.2 Měření s pohyblivou překážkou	47
5 Možnosti využití v praxi	51
5.1 Teoretický návrh medicínské aplikace	51
5.1.1 Možnosti navrhnutého scénáře	52

6 Závěr	53
Literatura	55
Seznam zkratk	59
A Příloha	61
A.1 Definice matice CSI pro IEEE 802.11	61

Seznam obrázků

1.1	Dosah standardů IEEE 802.11	14
1.2	Princip OFDM přijímače	16
1.3	Princip OFDM vysílače	16
1.4	Náznak komunikace ve fyzické vrstvě	20
1.5	Rámce PPDU 802.11n	21
1.6	CSI	23
2.1	Rozdělení frekvenčních pásem	25
2.2	Modelování výkonové bilance rádiového přenosu	27
3.1	Intel 5300 NIC	30
3.2	Vztah mezi CTF a CIR	34
4.1	Návrh měřicího scénáře pro přímou viditelnost	38
4.2	Odhad kanálu v kmitočtovém pásmu 5 GHz - přímá viditelnost	39
4.3	Odhad kanálu v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz - přímá viditelnost . . .	39
4.4	Návrh měřicího scénáře pro nepřímou viditelnost	40
4.5	Odhad kanálu v kmitočtovém pásmu 5 GHz - nepřímá viditelnost . .	41
4.6	Odhad kanálu v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz - nepřímá viditelnost .	41
4.7	Nákres rozměrů laboratoře SE7.107 a měřicí scénář	43
4.8	Odhad kanálu v místnosti ve frekvenční oblasti pro dynamické měření	45
4.9	Odhad kanálu v místnosti v časové oblasti pro dynamické měření . .	45
4.10	Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 0 m	47
4.11	Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 1 m	48
4.12	Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 2 m	48
4.13	Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 3 m	49
4.14	Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 4 m	49
5.1	Návrh nemocničního pokoje	51
A.1	Matice CSI pro systémovou šířku pásma 20 MHz	61
A.2	Matice CSI pro systémovou šířku pásma 40 MHz	61

Seznam tabulek

1.1	Přehled rodiny standardů IEEE802.11	12
3.1	Přehled hodnot SNR ve WLAN sítích	35
4.1	Konfigurace routeru D-link DIR-818LW	36

Úvod

Bezdrátové sítě *Wireless Local Area Network* (WLAN) se používají jako náhrada nebo doplnění k drátovému připojení lokálních sítí (LAN). Využívají se zejména ve vnitřním prostředí, lze je však využít i pro internetové pokrytí prostor s omezeným dosahem. V dnešní době je bezdrátová síť nedílnou součástí každé domácnosti, firmy či školy. Jedním z nejčastěji používaných standardů pro WLAN je standard IEEE 802.11n, přičemž lze říci, že je v současné době obsažen téměř v každém zařízení pro vysílání a příjem v sítích WLAN.

Standardy WLAN pro korektní demodulaci a dekodování signálu potřebují znát parametry přenosového prostředí mezi vysílačem a přijímačem. Přijímač v každém okamžiku přenosu signálu zjišťuje charakter přenosového prostředí. Mezi vysílačem a přijímačem se stav nebo vlastnosti přenosového prostředí mění v závislosti na statických či dynamických jevech. Tyto změny lze efektivně detekovat pomocí již vytvořeného nástroje CSI Tool 802.11n, kterého je využito v této práci.

Cílem této práce je využít síť WLAN pro detekci objektů nebo lidské aktivity v místnosti. Charakter práce je spíše experimentální, využívá se zde vícero měřicích scénářů, které jsou analyzovány pomocí programového prostředí MATLAB.

1 Standard IEEE 802.11

1.1 Přehled vydaných standardů

Wireless Local Area Network (WLAN) jsou bezdrátové sítě, které se používají jako náhrada nebo doplnění k pevnému (drátovému) připojení v lokálních počítačových sítích, angl. *Local Area Network* (LAN). Jedná se o bezdrátovou počítačovou síť, která se nejčastěji využívá k propojení přenosných zařízení nebo pro bezdrátové připojení do sítě Internet [1].

V dnešní době se sítě WLAN nepoužívají pouze ve vnitřním prostředí, ale lze je použít i pro internetové pokrytí prostor s omezeným dosahem [1]. Pro sítě WLAN je mezi běžnými uživateli zavedeno označení Wi-Fi. Zajímavostí je, že tato zkratka v podstatě nic neznamena. Důvodem, proč je tato zkratka spojována s „bezdrátovou věrností“ (*Wireless Fidelity*) je, že lidé, kteří tuhle zkratku založili, si ji neuměli představit bez doslovného vysvětlení [2].

V červnu roku 1997 byl standard IEEE 802.11 poprvé představen a sloužil jako bezdrátová alternativa k drátovým nebo kabelovým sítím LAN. Síť WLAN vychází právě ze specifikace IEEE 802.11, což je rodina standardů, jenž obsahuje základní schéma bezdrátové komunikace a definuje první a druhou vrstvu v ISO/OSI modelu. IEEE 802.11 je tedy sada specifikací pro fyzickou vrstvu (*physical layer*) a pro část linkové vrstvy (*link layer*) - Media Access Control (MAC).

Standard 802.11 tvoří a udržuje organizace *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Standard IEEE 802.11 je spravován 11. pracovní skupinou standardizační komise a spadá do řady standardů 802, kde se řeší otázky lokálních (LAN) a metropolitních sítí (MAN). Během relativně krátké doby bylo vytvořeno mnoho různých standardů fyzické vrstvy IEEE 802.11, jejichž označení se liší pouze v příponě, která je definovaná malými písmeny latinské abecedy.

Tab. 1.1: Přehled standardů IEEE 802.11 [3],[8].

IEEE	Rok vydání standardu	Kmitočtové pásmo [GHz]	Šířka pásma 1 kanálu [MHz]	Maximální přenosová rychlost [Mbit/s]	Modulace
802.11	1997	2,4	22	2	DSSS, FHSS
802.11a	1999	5	20	54	OFDM
802.11b	1999	2,4	22	11	DSSS
802.11g	2003	2,4	20	54	DSSS, OFDM
802.11n	2009	2,4 nebo 5	20 / 40	600	OFDM
802.11ac	2013	5	20/ 40 / 80 /160	6933	OFDM
802.11ad	2012	60	2160	6756	OFDM
802.11af	2014	0,54 až 0,79	6 / 7 / 8	26,7	OFDM
802.11ah	2016	0,9	1 / 2 / 4/ 8 /16	40	OFDM
802.11ax	předpoklad 2019	2,4 nebo 5	20/ 40 / 80 /160	9607,8	OFDM, OFDMA

IEEE 802.11 - První standard, který byl vydán v roce 1997 a definoval fyzickou vrstvu využívající ISM pásmo 2.4 GHz. Jeden kanál zabíral šířku 22 MHz a maximální přenosová rychlost dosahovala 2 Mbit/s. Fyzická vrstva byla postavena na modulační technice přímého rozprostření frekvenčního spektra (DSSS) a frekvenčním skákání (FHSS).

IEEE 802.11a - V roce 1999 následoval standard IEEE 802.11a, který nově využíval frekvenčního pásma 5 GHz. Šířka pásma jednoho kanálu činila 20 MHz. Standard IEEE 802.11a posunul maximální přenosovou rychlost na 54 Mbit/s. Rychlost byla navýšena hlavně díky tomu, že standard začal využívat širokopásmovou modulační techniku ortogonálního multiplexu s frekvenčním dělením (OFDM). Tato modulační technika se stala nedílnou součástí fyzické vrstvy drtivé většiny nadcházejících standardů.

IEEE 802.11b - Tento standard vznikl také roku 1999. Vychází z původního standardu 802.11, pracuje ve stejném pásmu a má i stejnou šířku kanálu. Pro přenos na fyzické vrstvě však používá pouze modulaci DSSS. Maximální teoretická přenosová rychlost činí 11 Mbit/s.

IEEE 802.11g - V roce 2003 byl uveden tento standard, který je velmi podobný

standardu IEEE 802.11a. Má obdobnou šířku kanálu 20 MHz i maximální přenosovou rychlost 54 Mbit/s. Na rozdíl od něj pracuje v pásmu 2,4 GHz a jeho fyzická vrstva je postavena na modulační technice DSSS a OFDM.

IEEE 802.11n - Standard uveden roku 2009. Výrazně posunul možnosti technologie WLAN. Může pracovat jak v kmitočtovém pásmu 2,4, tak v 5 GHz. Šířka pásma kanálu může činit 20 nebo 40 MHz. Fyzická vrstva pracuje s modulační technikou OFDM a maximální přenosová rychlost v tomto standardu narostla až na 600 Mbit/s. Nově se tu objevila i technologie *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), která je schopna v rádiovém kanálu využít více antén a tím i rapidně zvýšit přenosovou rychlost.

IEEE 802.11ac - Standard byl uveden v roce 2013 a je to momentálně nejrozšířenější standard z řady 802.11. Vychází zejména ze standardu 802.11n a rozšiřuje jej o dvě možné šířky kanálu - 80 a 160 MHz. Pracuje ve frekvenčním pásmu 5 GHz. V tomto standardu byla rozšířena mimo jiné i technologie MIMO. Maximální přenosová rychlost se teoreticky může vyšplhat až na 6,933 Gbit/s. Fyzická vrstva zde byla opět postavena na modulační technice OFDM.

IEEE 802.11ad - Standard byl uveden roku 2012 a od dřívějších standardů se liší zejména tím, že využívá jiné kmitočtové pásmo 60 GHz, čímž se pochopitelně i zvyšuje šířka pásma kanálu, která dosahuje 2160 MHz. Při využití vyšší frekvence dochází však rychleji k útlumu, proto je tento standard použitelný pouze pro malé vzdálenosti. Teoretická maximální přenosová rychlost je až 6,756 Gbit/s. Fyzická vrstva pracuje stejně jako u předchozích standardů s OFDM a rozprostřeným spektrem *Single Carrier* (SC).

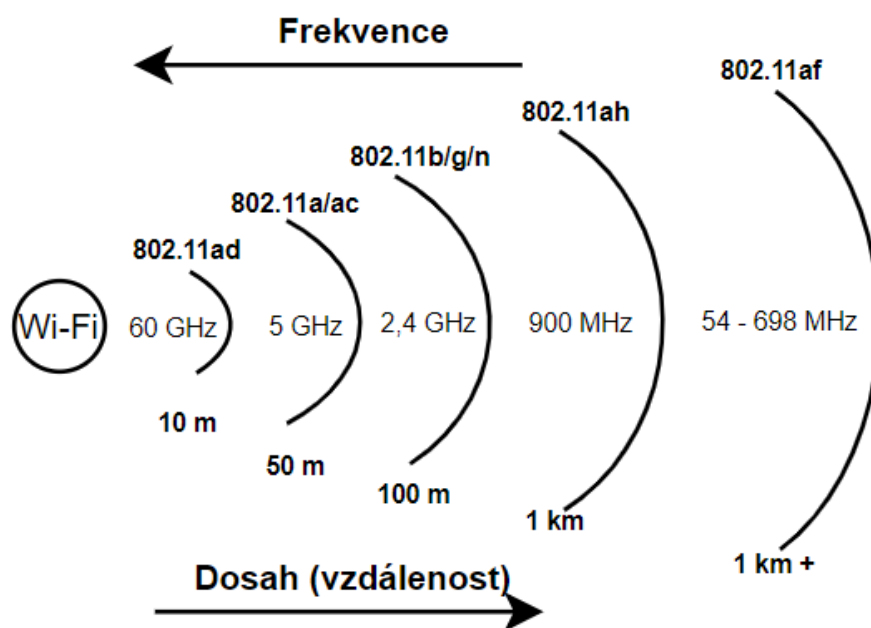
IEEE 802.11af a 802.11ah - Jedná se o novější standardy, byly uvedeny roku 2014 a 2016. Využívají kmitočtového pásma pod 1 GHz, s tím souvisí i malá šířka pásma kanálu, která se u obou standardů pohybuje v rámci jednotek MHz. Vznik těchto standardů je za účelem bezdrátového přenosu na větší vzdálenosti (desítky či stovky metrů), proto se zde pochopitelně nedá dosahovat takových rychlostí jako například u IEEE 802.11ac a 802.11ad. Fyzická vrstva je u těchto standardů opět postavena na OFDM.

IEEE 802.11ax - Předpokládané uvedení tohoto standardu je na konci roku 2019. Bývá označován jako *High-Efficiency Wireless* (HEW). Navazuje na standard IEEE 802.11ac, kdy je ještě rozšířen o kmitočtové pásmo 2,4 GHz. Předpokládaná maximální přenosová rychlost je až 9,6078 Gbit/s. Hlavní výhodou standardu je vyšší datová propustnost v zahlcených oblastech. Ta by se měla zlepšit oproti standardu 802.11ac až čtyřikrát.

Zmíněné maximální přenosové rychlosti u jednotlivých standardů nejsou pocho-
pitelně zcela reálné, jedná se o teoretický předpoklad. Reálné dosahované rychlosti
bývají mnohdy poloviční oproti teoretickým. Jelikož se jedná o bezdrátový přenos,
rychlost ovlivňuje mnoho faktorů jako je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem,
překážky na signálové cestě, zarušení oblasti a mnoho dalších.

Většina těchto standardů pracuje v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz, některé však
pracují v jiných frekvenčních pásmech. Pásmo v těchto kmitočtech jsou označo-
vány zkratkou ISM (*Industrial, Scientific, Medical*) [5]. Provoz bezdrátových zaří-
zení v těchto kmitočtových pásmech nemusí schvalovat Český telekomunikační úřad
(ČTÚ), ale i tak jsou zde určitá omezení [6]. Největší restrikce je zde v podobě
maximálního vyzářeného výkonu (EIRP). Jeho povolené hodnoty se liší v závislosti
na kmitočtovém pásmu a na zemi, kde se bezdrátová síť provozuje. V České repub-
lice je pro 2,4 GHz dovozen vyzářený výkon maximálně 100mW, a pro kmitočtové
pásmo 5 GHz je to až 1 W [7].

Jednotlivé standardy se liší také dosahem. Některé standardy jsou určeny pro
kratší a jiné pro delší vzdálenosti.



Obr. 1.1: Dosah jednotlivých standardů IEEE 802.11 [8].

Lze vidět, čím nižší kmitočtové pásmo, tím vyšší je dosah systému. Tomu odpoví-
dá, že na vyšších frekvencích je větší útlum volného prostoru (*free-space path loss*,
FSPL) [9].

1.2 Modulační techniky IEEE 802.11

Modulaci lze označit za nelineární proces, kterým se mění charakter nosného signálu za pomoci signálu modulačního. Výsledkem je signál modulovaný. V následujícím textu se budeme zabývat pouze digitálními modulacemi v základním pásmu [30]. Všechny dosud vydané standardy obsahují na fyzické vrstvě několik podtypů modulačních schémat. Je zde snaha o zpětnou kompatibilitu mezi jednotlivými standardy.

1.2.1 Rozprostřené frekvenční spektrum

První verze standardu IEEE byla 802.11, která definovala dva typy fyzické vrstvy: *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) a *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Obě metody pracují na principu rozprostírání frekvenčního spektra.

Modulační technika FHSS využívá kmitočtového skákání (*Frequency Hopping*), pomocí kterého dochází k rozprostření spektra. Tyto kmitočtové skoky jsou určeny kódovou sekvencí.

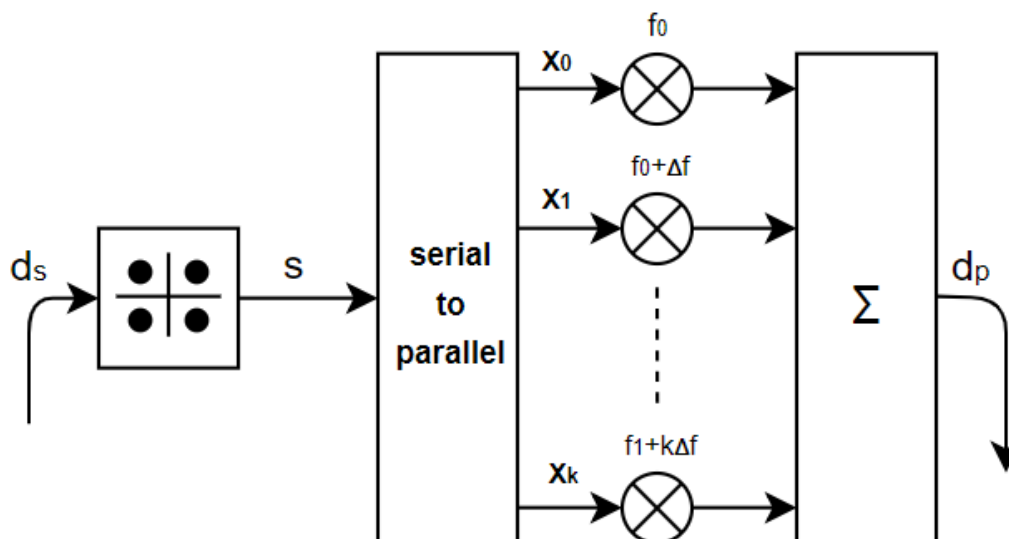
Technika DSSS spočívá v přímém rozprostření signálu pseudonáhodnou sekvencí. V principu se jedná o nahrazování každého jediného bitu danou bitovou sekvencí, která je následně přenášena komunikačním kanálem. Do přenosového kanálu tedy zavádíme nadbytečná (redundantní) data, což zvětšuje odolnost vůči rušení [10].

1.2.2 Ortogonální multiplex (OFDM)

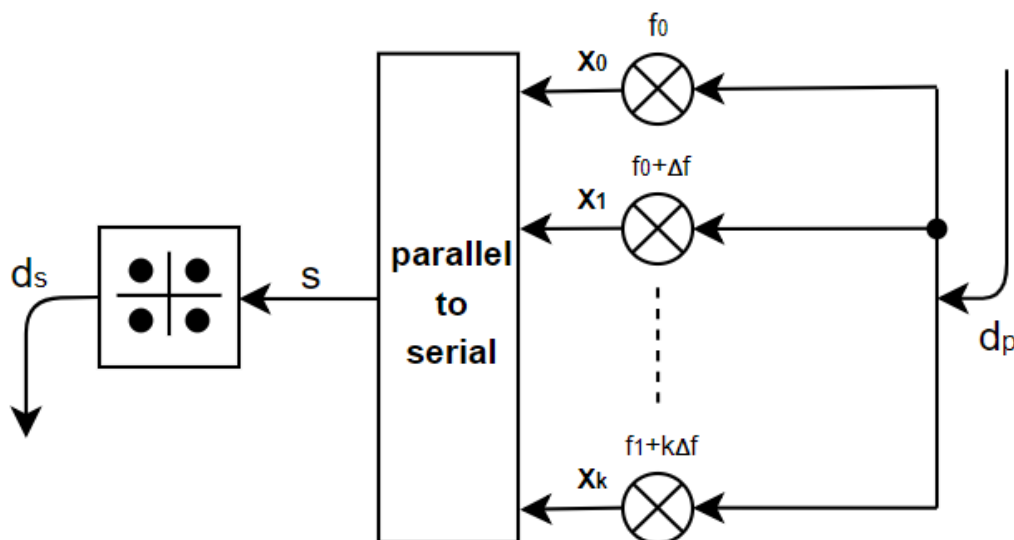
Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) byl jako první použit ve standardu 802.11a v pásmu 5 GHz. Tato modulační technika se od tohoto standardu stala nedílnou součástí fyzické vrstvy všech nadcházejících standardů. Ortogonální multiplex probereme o něco podrobněji, jelikož ho využívá i standard IEEE 802.11n, který je nedílnou součástí této práce.

Modulační technika OFDM využívá více nosných kmitočtů s rovnoměrným rozestupem. Vysílání je poté rozděleno do většího počtu signálů, které nezávisle na sobě přenášejí data. Výsledné spektrum signálu OFDM obsahující dostatečné množství subnosných má typicky pravoúhlý charakter. OFDM je považován za ortogonální systém, ve kterém dochází k překrývání spekter jednotlivých kanálů bez toho, aniž by se navzájem ovlivňovaly. Důsledkem toho je vyšší efektivita využití přiděleného frekvenčního pásma [11].

Sériový datový tok (bity) OFDM vysílače se nejprve převádí na symbol. Dále je signál rozdělen do k paralelních větví, kde v každé větvi figuruje právě jedna subnosná. Jednotlivé subnosné se na závěr sečtou a paralelní pomalá data se šíří rádiovým kanálem až k přijímači. Zde se inverzními kroky docílí toho, že na výstupu přijímače máme opět sériový datový tok [12]. Princip OFDM vysílače je ilustrován Obr. 1.2.



Obr. 1.2: Princip OFDM - vysílač [12].



Obr. 1.3: Princip OFDM - přijímač [12].

OFDM symbol $X(k)$ je vyjádřen spojitou funkcí času a pro dobu trvání T_s je dán rovnicí 1.1.

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi f_k t} \quad x \in [0, T_s], \quad (1.1)$$

kde $X(k)$ je OFDM symbol, T_s je symbolová perioda, k je indexem subnosné a f_k je frekvence na k -té subnosné. Pro frekvenci subnosných platí rovnice 1.2 a 1.3.

$$f_k = f_0 + k \cdot \Delta f, \quad (1.2)$$

$$\Delta f = 1 / T_s, \quad (1.3)$$

kde f_0 je minimální frekvence subnosné a Δf je frekvenční rozdíl mezi subnosnými. Příjímáčí strana OFDM je zakreslena na Obr. 1.3. V přijímači probíhají inverzní operace OFDM vysílače v obráceném pořadí.

Výhody a nevýhody OFDM

Výhodou OFDM je odolnost vůči odraženým signálům, které způsobují *Inter Symbol Interference* (ISI), a také vůči bitové chybovosti signálu BER. Lze ji tedy efektivně využívat v rádiovém prostředí, kde dochází k odrazům signálu. Nevýhodou této modulační techniky je velký poměr špičkového a průměrného výkonu *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) [30].

V přijímači mohou kromě ISI vzniknout i vzájemné interference *Inter Carrier Interference* (ICI) mezi jednotlivými nosnými, což zapříčiní nárůst chybovosti BER. Vložením časového intervalu *Guard Interval* (GI) do signálu na vysílací straně lze omezit vliv ICI [11].

1.3 IEEE 802.11n

Ve své práci využívám síťovou Wi-Fi kartu INTEL 5300 společně s nástrojem CSI Tool 802.11n k měření bezdrátového kanálu. Kanálové informace se měří z přijatých paketů pouze za předpokladu, že jsou přenášeny pomocí standardu 802.11n, a proto se v této kapitole podrobněji věnuji standardu IEEE 802.11n, respektive jeho fyzické vrstvě.

Standard IEEE 802.11n, také známý jako Wi-Fi 4, byl vyvíjen již od roku 2004. Byly navrženy takové úpravy fyzické vrstvy, aby výsledná rychlost dosahovala řádu stovek Mbit/s [13]. Cílem bylo dosáhnout takové přenosové rychlosti, která byla u tehdejších kabelových sítí Ethernet běžná.

Standard IEEE 802.11n zahrnuje několik nových technologií, které zlepšují nejen výkonost, ale i spolehlivost a předvídatelnost sítí WLAN. Pokud nebereme v potaz to, že v tomto standardu můžeme využívat jak kmitočtové pásmo 2,4, tak 5 GHz, můžeme říci, že třemi hlavními inovacemi v tomto systému jsou:

- *Multiple Input Multiple Output* (MIMO)
- Agregace paketů
- Rozšíření šířky pásma 1 kanálu (40 MHz)

Patrné zvýšení přenosové rychlosti bylo dosaženo díky užití technologie *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Tato technologie je schopna v jednom rádiovém kanálu využít více antén, pomocí kterých se přenáší odlišná data různými cestami. Je tedy možné mít několik vysílacích antén, které vysílají signál k několika přijímacím anténám. Využitím této technologie se zvyšuje průchodnost dat v rádiovém kanálu a zároveň se zvyšuje i kapacita systému bez toho, aniž bychom museli rozšiřovat kmitočtové pásmo kanálu nebo zvyšovat výkon vysílaného signálu.

Agregace neboli spojování paketů je v tomto standardu zefektivněna tím, že jednotlivé datové pakety jsou spojovány do jednoho přenosového rámce. Tímto způsobem lze tedy posílat několik paketů pomocí jednoho fixního přenosového rámce.

Nejjednodušší způsob, jak zvýšit kapacitu v rádiovém kanálu, je zvětšit jeho šířku pásma. Šířka pásma kanálu standardů je ve většině případů 20 MHz. Standard IEEE 802.11n umožňuje kombinaci dvou takových kanálů, čímž vznikne kanál s šířkou pásma 40 MHz a je přibližně zdvojnásobena přenosová rychlost. Nejúčinnější je tato technika v kmitočtovém pásmu 5 GHz, jelikož v pásmu 2,4 GHz nejsme schopni využít celou šířku kanálu o velikosti 40 MHz [13].

1.3.1 IEEE 802.11n - fyzická vrstva (PHY)

Standardy IEEE 802.11 definují první a druhou vrstvu v ISO/OSI modelu. Je to vrstva linková (*link layer*) a vrstva fyzická (*physical layer*, PHY). Právě druhou zmiňovanou vrstvou se v této kapitole budeme detailněji zabývat.

Fyzická vrstva (PHY) pracuje na úrovni hardwaru. Definuje elektrické, fyzické a funkční parametry týkající se fyzického propojení jednotlivých zařízení. Zajišťuje převod bitů na signál a naopak. Její účel tedy spočívá v přípravě dat k přenosu a současně se také stará o příjem a vysílání těchto dat. Dále zajišťuje volbu správné modulační techniky a kódovacího schématu v dotyčném přenosovém kanálu.

Architektura fyzické vrstvy (PHY)

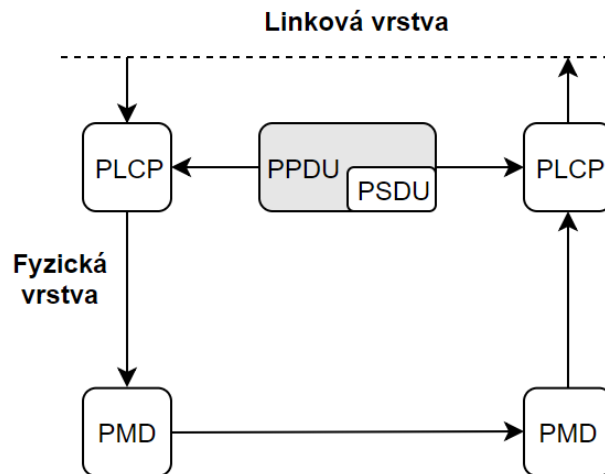
Fyzická vrstva (PHY) je ve všech standardech IEEE 802.11 rozdělena do dvou podvrstev:

- *Physical Medium Dependent* (PMD)
- *Physical Layer Convergence Procedure* (PLCP)

Podvrstva PMD zodpovídá za přenos dat mezi vysílačem a přijímačem. Má na starosti modulaci a demodulaci. Zároveň nastavuje vysílací frekvenci a velikost vysílaného signálu.

Podvrstva PLCP k jednotlivým datovým paketům přikládá informace o modulaci a použitém přenosovém mechanismu. Díky PLCP je tedy přenášený datový paket prakticky nezávislý na typu fyzické vrstvy. V této podvrstvě je implementován i protokol CCA (*Clear Channel Assessment*), který poskytuje informaci o připravenosti přenosového média linkové podvrstvě MAC.

Podvrstvy PLCP se u jednotlivých standardů IEEE 802.11 liší, a to proto, že standardy používají odlišné přenosové mechanismy, potažmo jiné struktury fyzických paketů [15],[16]. Komunikace mezi podvrstvami je znázorněna na Obr. 1.4.



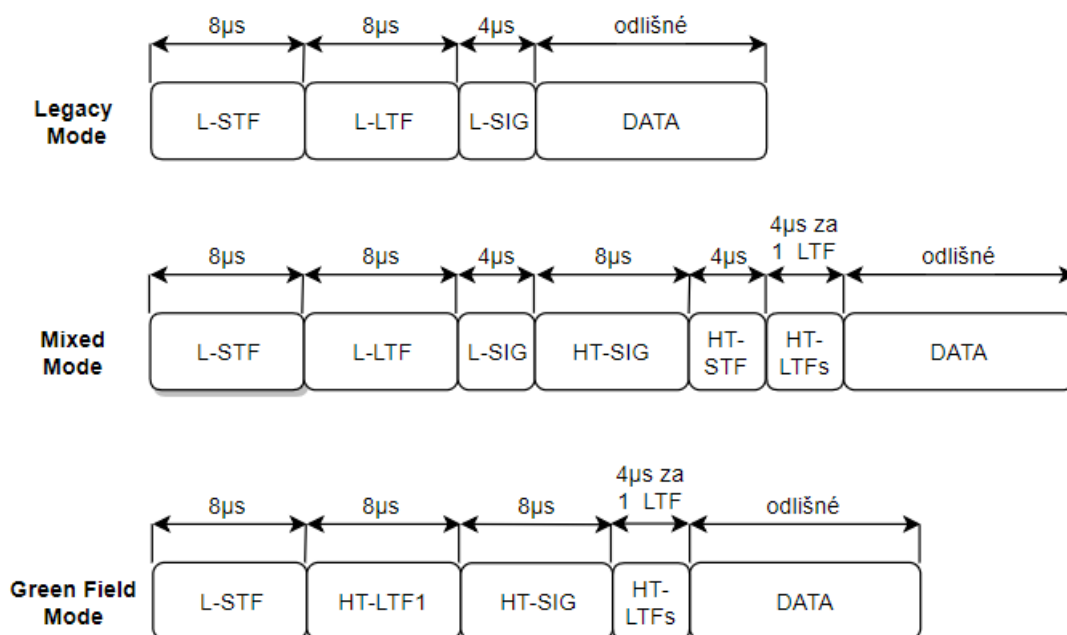
Obr. 1.4: Komunikace - fyzická vrstva (PHY) [3],[15].

PLCP - IEEE 802.11n

Zde se uživatelská data a řídicí informace formují do fyzických paketů *PLCP Protocol Data Unit* (PPDU). Typické je, že na začátku paketu jsou adresní informace a poté následují uživatelská data. Standard 802.11n podporuje původní formát PPDU, který užívaly standardy 802.11 a/b/g a kromě toho také definoval dva nové formáty. Fyzická vrstva standardu IEEE 802.11n tedy může v reálném čase operovat v jednom ze tří těchto módů:

- Legacy Mode
- Mixed Mode
- Green Field Mode

Legacy Mode odkazuje na standardy 802.11 a/b/g a na původní formát PPDU. Z tohoto módu vychází dvě nové struktury, které přišly společně se standardem 802.11n - Mixed Mode a Green Field Mode, viz Obr. 1.5. Ty jsou již označovány jako *High Throughput* (HT) formáty, tedy s větší přenosovou rychlostí.



Obr. 1.5: IEEE 802.11n rámce (PPDU) [16].

Green Field Mode

Na rozdíl od dvou zmíněných módů je tu obsažena preamble s vysokou propustností (HT). To znamená, že formát není zpětně kompatibilní se staršími klienty využívající Legacy Mode.

Zařízení využívající standard IEEE 802.11n v tomto HT formátu mají tu výhodu, že na stejném kanálu nejsou žádná zařízení standardů IEEE 802.11a/b/g, protože nemohou komunikovat s Green Field přístupovým bodem. Zařízení využívající starších standardů používají Legacy Mode, který není kompatibilní s HT formátem Green Field Mode. Nesporná výhoda tohoto HT formátu je to, že přenos díky využití odlišného kanálu, nemůže být ovlivněn signály zařízení starších standardů 802.11a/b/g. Tím se dá vyhnout kolizím, které zvyšují bitovou chybovost, a tím ztrátu přenosové rychlosti [17].

Obecně se PPDU skládá z preamble (STF a LTF), hlavičky (SIG) a samotných dat (DATA). V Green Field Mode je skladba rámce velice podobná jako u dřívějších formátů. Liší se pouze v tom, že na rozdíl od dřívějších verzí se tu pracuje s čistě HT preambulí.

Rozdělení rámce PPDU pro formát Green Field Mode

Preamble:

Legacy Short Training Field (L-STF) - Modulace tu probíhá rychlostí 6 Mbit/s a má periodu 0,8 μ s. V celém poli je deset takových period, doba trvání L-STF je tedy 8 μ s. Hovoříme-li o 20 MHz šířce kanálu, tak obsahuje sekvenci dvou OFDM symbolů rozdělených do 12 subnosných. U 40 MHz přenosové kanálu je této sekvenci přiděleno 114 subnosných (-58 až -2 a 2 až 58). Některé z nich jsou fázově otáčeny o 90°, kvůli poměru špičkového a průměrného výkonu PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) signálu, který je u OFDM poměrně velký a patří mezi nevýhody OFDM. Sekvence symbolů OFDM slouží k rozpoznání začátku rámce a dochází zde k synchronizaci. Kanálové kódování se zde neprovádí.

High Throughput Long Training Field (HT-LTF1) - Doba trvání je 8 μ s. Obsahuje sekvenci 2 OFDM symbolů, které jsou rozděleny do subnosných. Nově se tu objevují 2 ochranné intervaly, které zajišťují, aby se přenosy navzájem neovlivňovaly.

High Throughput Long Training Fields (HT-LTFs) - Předpokladem je, že je zde několik rámců HT-LTF, které můžeme rozdělit na 2 části. V první části je obsaženo 1 až 4 HT-LTF, které jsou nezbytné pro demodulaci dat. Druhá volitelná část obsahuje 0 až 4 HT-LTF, které mohou být využity k testování technologie MIMO. Doba trvání závisí na počtu HT-LTF.

Hlavička:

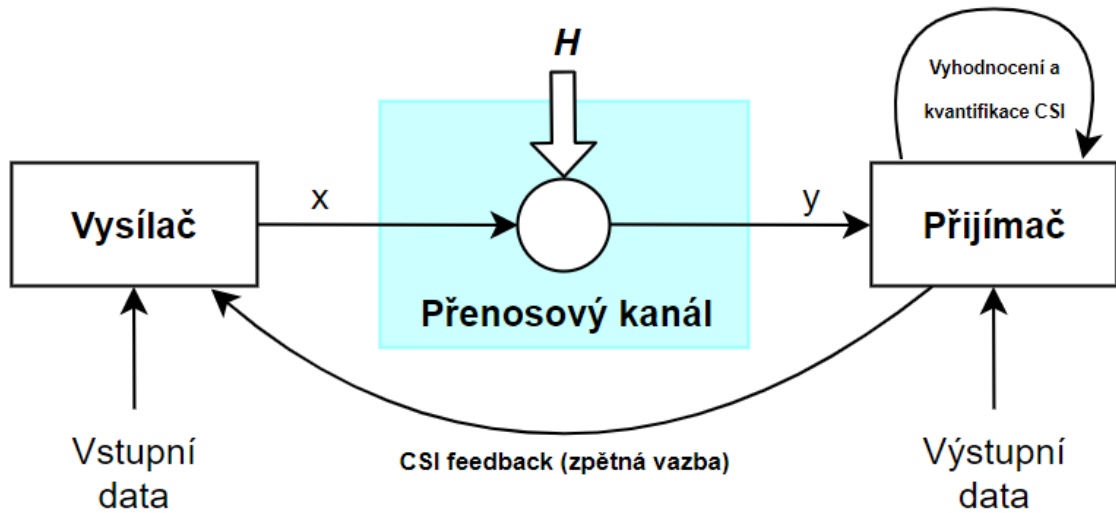
High Throughput Signal Field (HT-SIG) - Od původně využívané hlavičky L-SIG se liší délkou svého trvání. Je dvakrát delší a trvá tedy 8 μ s. Je tu obsažena sekvence 2 OFDM symbolů. HT-SIG dělíme na HT-SIG1 a HT-SIG2, oba dva rámce mají 23 bitů. V HT-SIG1 se vyskytují informace o velikosti HT paketu a o tom jakou šířku má přenosový kanál (20 nebo 40 MHz). V rámci HT-SIG2 je 8 bitů ponecháno pro CRC (*Cyclic redundancy check*), což je běžná technika pro detekování chyb v přenosu. Na konci rámce jsou opět tail bity, které tu plní stejný účel jako u L-SIG.

Data:

DATA - Zde jsou přenášena uživatelská data z vyšších vrstev a servisní informace *PLCP Service Data Unit* (PSDU). Na konci rámce se vyskytují tail bity (potřebné pro reset kodéru) a pad bity pro doplnění přenosu na určitou standardní velikost. Datová část může být přenášena vyššími rychlostmi na rozdíl od preamble a hlavičky [16].

1.4 Channel State Information (CSI)

V bezdrátové komunikaci CSI odkazuje na vlastnosti přenosového kanálu. CSI popisuje šířící se signál mezi vysílačem a přijímačem, popisuje amplitudu a fázi každé jednotlivé subnosné. Odvození CSI je znázorněno na Obr. 1.6.



Obr. 1.6: Odvození CSI [4],[22].

Z obrázku je zřejmé, že vyhodnocení a kvantifikace CSI probíhá na straně přijímače, který následně zpracované informace odesílá nazpět. Odvození CSI je možno také popsat vztahem, který přímo vychází z Obr. 1.6.

$$\mathbf{H} \approx \mathbf{y} / \mathbf{x}, \quad (1.4)$$

kde \mathbf{H} je kanálovou maticí, \mathbf{y} přijímaný vektor a \mathbf{x} vektor vysílaný. Vztah je pouze orientační, jelikož zde není uvažovaný šum. Pro jednotlivé subnosné platí následující komplexní vztah.

$$\mathbf{H}(f_c) = |\mathbf{H}(f_c)|e^{j\sin(\angle \mathbf{H})}, \quad (1.5)$$

kde $\mathbf{H}(f_c)$ charakterizuje CSI hodnotu subnosné se střední frekvencí f_c , tedy amplitudu, a $\angle \mathbf{H}$ reprezentuje fázi [22]. Je nutné si uvědomit, že CSI jednoho celého paketu je charakterizováno právě maticí \mathbf{H} , která je trojrozměrná. První rozměr udává počet vysílacích antén, druhý počet přijímacích antén a třetím rozměrem jsou charakterizovány CSI hodnoty pro jednotlivé subnosné. Při systémové šířce pásma 20 MHz je

v třetím rozměru obsaženo 56 subnosných a při šířce 40 MHz 114 subnosných [4].

Mluvíme-li o reálných aplikacích, lze CSI rozdělit na statistické a okamžité.

- Statistické CSI - označováno jako *long-term* CSI, u kterého je známá statistická charakteristika kanálu. To zahrnuje například průměrný zisk kanálu, čáru viditelnosti nebo prostorovou korelaci. Tyto údaje lze využít k optimalizaci přenosu.
- Okamžité CSI - označováno jako *short-term*. Jsou u něj dány aktuální podmínky kanálu, je tedy známá impulzní odezva. To umožňuje přizpůsobit přenášený signál impulsní odezvě, čímž je možné optimalizovat přijatý signál nebo snížit chybovost [22].

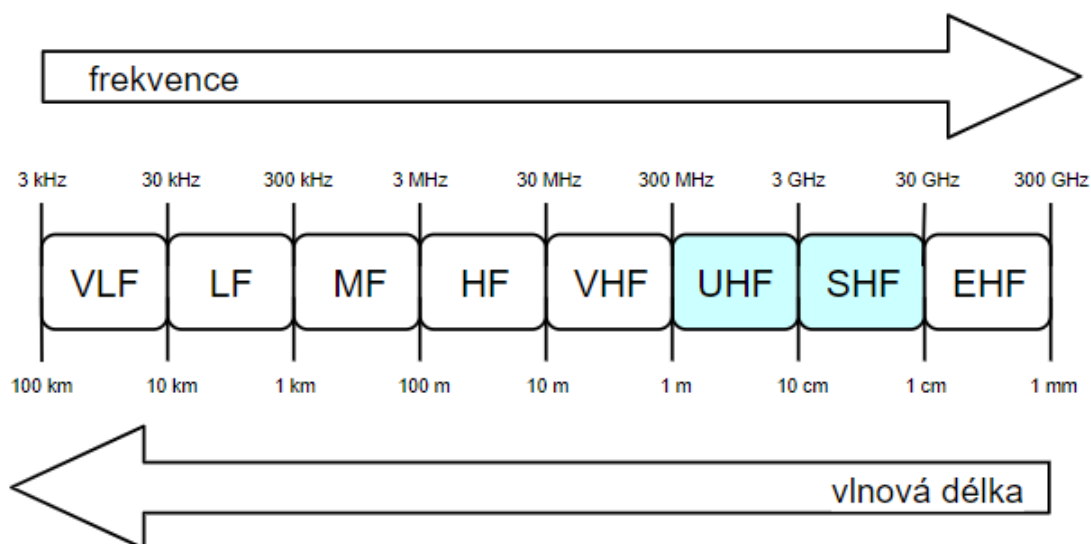
2 Šíření vln uvnitř budov

Praktická část této práce zkoumá kanál mezi vysílací stanicí a přístupovým bodem pomocí dostupných nástrojů. Veškerá experimentální měření jsou prováděna uvnitř budov. Jelikož se jedná o bezdrátovou síť, je zkoumání kanálu mnohem složitější než u kabelové sítě a uplatňuje se tu více nepříznivých jevů prostředí, které mají vliv na přenosový kanál.

Prostředníkem, který transportuje informace prostorem, jsou elektromagnetické vlny. Samotný návrh sítě a určení jejího kmitočtového i prostorového rozložení je velmi komplexním problémem, který nezahrnuje pouze legislativu, ekonomické a technické parametry. Je nutno brát v potaz právě problematiku šíření elektromagnetických vln.

2.1 Šíření vln

Šíření elektromagnetických vln vychází z vlnové rovnice, která je přímo odvozena z Maxwellových rovnic [18]. Chování elektromagnetické vlny je určeno primárně její pracovní frekvencí tedy vlnovou délkou. Rozměry objektů a délka vlny v prostředí, kde se vlna šíří, jsou určujícím faktorem toho, jakým způsobem se vlna bude při šíření ohýbat, odrážet a tlumit.



Obr. 2.1: Rozdělení frekvenčních pásem pro rádiový přenos dle ČTÚ [20].

Bezdrátový standard IEEE 802.11n využívaný v této práci pracuje v kmitočtovém pásmu 2,4 a 5 GHz. Z Obr. 2.1 je zřejmé, že z hlediska šíření vln v těchto frekvenčních pásmech uvažujeme pouze super krátké vlny SHF (*Super High Frequency*) a ultra krátké vlny UHF (*Ultra High Frequency*). Důvodem využívání centimetrových SHF a decimetrových UHF vln pro WLAN sítě jsou velmi vhodné vlastnosti elektromagnetických vln: dobrá schopnost odrážet se, poměrně malé ztráty šířením a schopnost pronikat překážkami v zástavbě. Kratší vlnové délky umožňují konstrukci také menších antén [19].

V zástavbě se šíří přízemní prostorová vlna, která se v reálném světě šíří mezi oběma anténami spoje s odrazy, ohyby a rozptyly způsobenými překážkami. Sítě WLAN realizované pomocí standardu IEEE 802.11n jsou svým rozsahem maximálně v řádu desítek metrů. Neuvažují se tu jevy v přízemních vrstvách atmosféry, jako jsou troposférická refrakce, útlum hydrometeory, útlum atmosférických plynů a další.

Zkoumaným prvkem je část komunikačního řetězce mezi vysílačem a přijímačem, která představuje přeměnu elektromagnetické energie vedené (např. napájecím kabelem) na energii vyzářenou pomocí antény. Následuje přenos formou elektromagnetické vlny přenosovým prostředím a zpětná transformace vlny vyzářené na vlnu vedenou. Při realizaci bezdrátového spoje je nutno brát v úvahu druh spoje, vlastnosti přenosového prostředí, typ a umístění antény. Pro popis tzv. pokrytí existují dvě možnosti. Úroveň signálu je popsána jako intenzita elektrického pole nebo jako výkonová úroveň přijatá referenční anténou.

Pro šíření vlny v idealizovaných podmínkách volného prostoru platí následující rovnice [21].

$$E_{\text{ef}} = \frac{\sqrt{30P_V G_V}}{d}, \quad (2.1)$$

kde E_{ef} je efektivní hodnota intenzity elektrického pole (V/m) v bodě pozorování, P_V výkon (W) na vstupu vysílací antény, G_V zisk (-) vysílací antény a d vzdálenost (m) vysílací antény a bodu příjmu. Je-li v bodě příjmu přijímací anténa, tak za předpokladu impedančního přizpůsobení uvažujeme následující vztahy.

$$P_p = \frac{E_{\text{ef}}^2}{120\pi} \cdot \frac{G_p \lambda^2}{4\pi} = P_V G_V G_p \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2, \quad (2.2)$$

$$SNR_p = \frac{P_p}{kTB} \cdot \frac{1}{F} = \frac{P_V G_V G_p}{kTB} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot \frac{1}{F}, \quad (2.3)$$

kde P_p je výkon (W) přijatý přijímací anténou v bodě pozorování, λ vlnová délka

(m), G_p zisk (-) přijímací antény, k Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T teplota (K), B šířka přenášeného frekvenčního pásma (Hz), F šumové číslo (-) přijímací antény a SNR_p poměr síly signálu k síle šumu v určené šířce pásma (dB). V praxi se obvykle používá vyjádření v decibelech, pro které platí rovnice (2.4).

$$P_p = P_v + G_v + G_p - FSL(d) - L, \quad (2.4)$$

kde P_p je přijatý výkon (dBm), P_v výkon na vstupu vysílací antény (dBm), G_v a G_p zisky antén (dB), $FSL(d)$ ztráty volným prostorem (dB) a L ztráty šířením (dB) v daném prostředí (ve volném prostoru se neuvažují). Pro užití rovnice (2.4) je nutné jednotlivé veličiny vyjádřit ve správných jednotkách. K přepočtu veličin slouží následující vztahy [21].

$$FSL(d)_{dB} = 10\log\left[\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2\right], \quad (2.5)$$

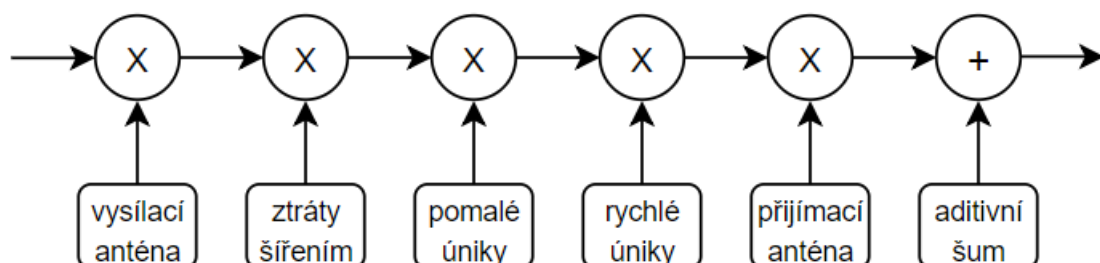
$$G_{dB} = 10\log(G), \quad (2.6)$$

$$L_{dB} = 10\log(L), \quad (2.7)$$

$$P_{dBm} = 10\log\left(\frac{P}{10^{-3}}\right). \quad (2.8)$$

2.2 Signál v přenosovém kanálu

Signál šířící se prostředím mezi vysílací a přijímací anténou je tlumen a kolísá vlivem působení nejrůznějších fyzikálních mechanismů, viz Obr. 2.2. Ztráty šířením, popřípadě kolísání úrovně signálů závisí zejména na vzdálenosti antén od sebe a na prostředí jakým se signál šíří.



Obr. 2.2: Modelování výkonové bilance rádiového přenosu v zástavbě [19].

Na obou koncích spoje se uplatňuje zisk antén, kterým je nutné vynásobit přijímanou výkonovou úroveň signálu. U přijímací antény se přičítá aditivní šum způsobený šumem přijímače a interferencemi. Samotný útlum šíření daným prostředím je charakterizován třemi složkami.

- Ztráty šířením (*path loss*) - útlum závislý především na délce spoje a typu prostředí. Jedná se o časově neproměnnou složku, která představuje střední hodnotu signálu v určitém bodě pozorování a jeho blízkém okolí. Hodnota se získává na základě většího počtu měření okamžité hodnoty úrovně signálu v dostatečně dlouhém časovém intervalu.
- Pomalé úniky (*slow fading*) - útlum způsobený zastíněním spoje překážkou. Ke kolísání výkonové úrovně signálu dochází z hlediska vlnové délky „pomalu“. Typickým jevem pro pomalé úniky je pokles úrovně signálu vůči základnímu průběhu. Tento pokles může činit až desítky dB, záleží na konkrétní situaci.
- Rychlé úniky (*fast fading*) - způsobují velmi rychlé a hluboké výkyvy úrovně signálu. Jsou zapříčiněny především vícecestným šířením a dopplerovským posuvem, který vzniká důsledkem pohybu okolních objektů nebo antény. Jsou silně proměnné v čase. Vlny se přenosovým prostředím šíří pomocí odrazů po mnoha různých drahách. Zpoždění odražených vln může být až desítky milisekund, závisí podle vzdálenosti objektů, od kterých se odráží. Rychlé úniky vykazují Rayleighovo rozložení v čase s nulovou střední hodnotou. Při přímé viditelnosti mezi vysílací a přijímací anténou se jedná o zvláštní případ Rayleighova rozložení - Riceovo rozložení [28].

Na základě popsaných fyzikálních mechanismů lze celkový útlum šířením uvažovat jako součet dvou složek.

$$L_c(p, t) = L(p) + X(t), \quad (2.9)$$

kde $L_c(p, t)$ jsou celkové ztráty šířením (dB) pro anténu v místě p a čase t , $L(p)$ střední hodnota ztrát (dB) daná pozicí antény p a $X(t)$ náhodná časově proměnná složka ztrát (dB) daná rozložením pomalých a rychlých úniků v čase [19].

2.3 Klasifikace šíření vln dle typu prostředí v zástavbě

Šířící se vlna je ovlivněna překážkami v přenosovém prostředí. Dochází k jevům, jako jsou odrazy, rozptyl a difrakce. Charakter šíření signálu mezi vysílací a přijímací anténou je určen především okolním prostředím a samotným umístěním antén. Prostředí, kde se odehrává šíření signálu, lze rozdělit do buněk [19].

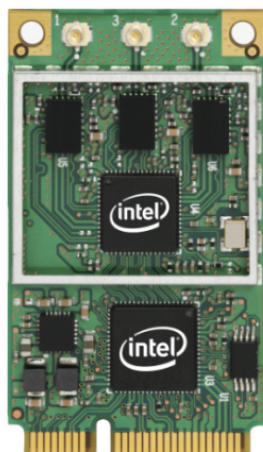
- makrobuňka (*macrocell*) - pevná anténa je umístěna nad úrovní střech zástavby. Rozměry makrobuňky jsou v řádu kilometrů.
- mikrobuňka (*microcell*) - pevná anténa je pod úrovní okolních střech zástavby. Rozměry mikrobuňky jsou typicky 100 m až 1 km.
- pikobuňka (*picocell*) - pevná anténa je uvnitř budovy. Rozměry pikobuňky se pohybují v řádu metrů.

V praktické části práce, kde jsou provedena experimentální měření, je vysílací i přijímací anténa umístěna v rámci jedné místnosti. Využíváme tedy pikobuňky. Vlivem velké četnosti interiérů představuje, z hlediska šíření vln, pikobuňka nejkomplikovanější případ umístění obou antén. Je nutno brát v úvahu umístění interiéru a jeho proměnlivost. Útlum šíření závisí i na typu materiálů, například sádrokartonové stěny mají zpravidla menší útlum než zděné konstrukce [19].

3 CSI Tool 802.11n

Nástroj CSI Tool používá upravený firmware Wi-Fi karty INTEL 5300 za pomoci operačního systému Linux. Zahrnuje v sobě veškerý software a skripty potřebné k provádění různorodých experimentů. Hlavní devízou tohoto nástroje je zejména čtení a analýza kanálových měření [23].

Síťová karta INTEL 5300 NIC poskytuje standardu IEEE 802.11n CSI v maticovém formátu pro 30 skupin, které jsou tvořené subnosnými. Standard IEEE 802.11n může využívat 20 nebo 40 MHz šířku kanálu, dle toho se liší i počet subnosných v jedné skupině. Pro 20 MHz uvažujeme 64 subnosných, proto jsou v jedné skupině obsaženy přibližně 2 subnosné. Pro 40 MHz uvažujeme 128 subnosných, v jedné skupině jsou obsaženy přibližně 4 subnosné. Každá matice je komplexní číslo s osmibitovým vyjádřením jak pro reálnou, tak pro imaginární část [23].



Obr. 3.1: Intel 5300 NIC [24].

3.1 Nastavení a možnosti nástroje CSI Tool

CSI Tool je kompatibilní s operačními systémy Linux, které jsou založeny na verzi jádra Linuxu 3.2 po verzi 4.2. Nástroj vychází z vyjmutého firmwaru Wi-Fi karty INTEL 5300, a proto funguje pouze s jejím využitím.

3.1.1 Základní Instalace

Instalace se provádí pomocí terminálu v prostředí Linux. Zde využíváme zejména verzovacího klientu Git, jenž umožňuje komunikaci s webovou službou GitHub, která nabízí bezplatný prostor pro open source projekty. Právě v jednom repozitáři této služby se nachází modifikovaný bezdrátový ovladač a modifikovaný firmware Wi-Fi karty INTEL 5300. Tyto dva prvky jsou nejdůležitějšími komponenty pro práci s CSI [24]. Základní instalaci tohoto nástroje lze rozdělit do následujících kroků:

- přípravné kroky
- instalace modifikovaného bezdrátového ovladače
- instalace modifikovaného firmwaru
- vytvoření nástroje pro protokolování uživatelského prostoru
- povolení protokolování a testování

V první fázi instalace je nutné splnit určité prerekvizity. Konkrétně se jedná o nainstalování vytvářecích nástrojů, vývojového záhlaví systému Linux a klienta Git.

Poté následuje instalace modifikovaného bezdrátového ovladače, kde pomocí nástroje Git naklonujeme do naší vysílací stanice z repozitáře na GitHubu zdrojové soubory nástroje CSI Tool, který obsahuje úpravy bezdrátového ovladače [24]. Následně vytvoříme modifikovaný ovladač pro existující Linuxové jádro a nainstalujeme jej.

Po instalaci ovladače je nutno doinstalovat modifikovaný firmware. Opět použijeme nástroje Git k naklonování příslušných souborů, tentokrát však využijeme jiný repozitář [24]. Po naklonování musíme přemístit existující firmware Wi-Fi karty INTEL 5300 a poté nainstalujeme firmware modifikovaný.

K tomu abychom mohli s CSI efektivně pracovat, je potřeba vytvoření nástroje pro protokolování uživatelského prostoru. V podstatě vytvoříme nástroj, který pomocí příkazového řádku dokáže CSI získané pomocí modifikovaného ovladače, zapisovat do souboru. V posledním bodu instalace je třeba softwarově vyjmout ovladač původní a načíst ovladač modifikovaný [24].

Po splnění těchto kroků, lze v odlišném terminálu využít vhodného příkazu pro ověření funkčnosti spojení mezi vysílačem a přijímačem. Lze využít příkaz ping, který periodicky odesílá data a čeká na odezvu protistrany. Pokud jsou odpovědi posílány zpět s vysokou propustností (802.11n), tak se zapisuje CSI pro každý přijatý paket do souboru.

3.1.2 Omezení nástroje

Nástroj jako takový má i určitá omezení, na která je nutno brát ohled. Nemůžeme například komunikovat se zašifrovaným přístupovým bodem. Je to dáno tím, že firmware nemá dostatek kódovacího prostoru na to, aby řešil i otázku zabezpečení bezdrátové sítě. CSI se taktéž měří pouze z paketů, které jsou přenášeny pomocí standardu 802.11n typu HT.

Nevýhodou CSI Tool 802.11n je také to, že firmware nelze žádným způsobem modifikovat. Tento nástroj byl při vývoji pod dohledem firmy Intel, a proto změny ve firmwaru nepřipadají v úvahu.

Jak bylo řečeno dříve, nástroj zapisuje CSI informace do souboru a přistupujeme k nim až po skončení měření. Nástroj však může pracovat i v reálném čase, CSI informace jsou poskytovány ihned a nemusíme přistupovat k žádnému souboru [25].

3.2 Dosažitelné charakteristiky a výstupy

Nástroj CSI Tool 802.11n umožňuje zápis CSI hodnot do souboru. Nejeftektivnějším způsobem zápisu je využití příkazu ping, který periodicky odesílá datové pakety a čeká na odezvu protistrany. Pochopitelně hodnoty v souboru jako takovém pro nás nemají žádnou hodnotu, proto je tu možnost hodnoty ze souboru vyčíst a pomocí příkazů v terminálu Linux naimportovat do programu MATLAB nebo Octave, kde lze s daty efektivně pracovat matematicky i graficky [24].

3.2.1 Dostupné informace o přenosovém kanálu

Veškeré informace o přenosovém kanálu mezi vysílačem a přijímačem získané pomocí nástroje CSI Tool jsou obsaženy v datovém souboru. Velikost tohoto souboru závisí na tom, jaký počet paketů je do něj pomocí příkazu ping nahráno. Každý paket je možné si představit jako jednu strukturu. Pokud je odesláno 10 paketů z vysílače do přijímače, je do souboru nahráno 10 struktur. Nástroj umožňuje zápis CSI informace pro každý jednotlivý paket.

Ke strukturám, které charakterizují pakety, lze přistupovat jednotlivě, a to pomocí programového prostředí MATLAB nebo Octave. Dostupné CSI informace z datového souboru pro jednu strukturu jsou:

- počet měření tvaru paprsku (*number of beamforming measurmenets*) - udává

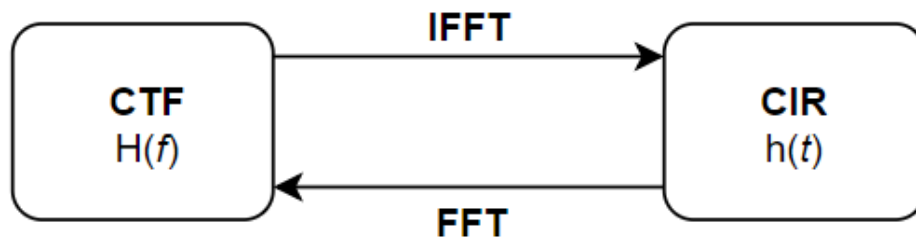
celkový počet měření tvaru paprsku, které byly zaznamenány ovladačem na přijímací straně a odeslány zpět straně vysílací. Přenosový kanál mezi vysílací a přijímací stranou je ztrátový, tuto hodnotu lze tedy použít k detekci měření, která byla na přenosové cestě zrušena.

- počet využitých antén (*count of antennas in use*) - reprezentuje počet využívaných antén pro přijímání (Nrx) a vysílání paketu (Ntx). Pro kontrolu nad využívanými anténami je nutné vhodné nastavení přijímače.
- *Received Signal Strength Indication* (RSSI) - termín se využívá pro přijímače a představuje hodnotu úrovně signálu na vstupu každého anténního portu. Hodnota je charakterizována v dB vzhledem k interní referenci.
- *Automatic Gain Control* (AGC) - automatické zesílení zisku signálu probíhá na přijímací straně. U bezdrátového přenosu se uplatňují nepříznivé jevy prostředí. Pomocí AGC jsme schopni přijatý signál zesílit a tyto jevy potlačit [27].
- šumové pozadí (*noise floor*) - jedná se o výkonovou úroveň signálu vytvořenou součtem všech zdrojů šumu v rámci měřicího systému, kde je šum definován jako jakýkoli jiný signál než ten, který je monitorován.
- rychlost paketu (*rate*) - rychlost se kterou byl paket odeslán. V terminálu operačního systému Linux lze požadovanou rychlost paketu upravovat dle vlastní potřeby. Výsledná rychlost se však od té teoretické často liší. Pro zjištění rychlosti paketu lze přímo využít i příkaz ping.
- CSI matice - jedná se o matici $Ntx \times Nrx \times 30$, kde první dva rozměry určují počet antén využívaných pro přenos a třetím rozměrem je charakterizováno 30 subnosných v OFDM kanálu.

Společnost INTEL poskytuje informace o přenosovém kanálu v určité referenční úrovni. Pomocí polí výše popsané struktury lze však CSI matematicky vyjádřit v absolutních jednotkách [24]. Normalizované CSI lze považovat za odhad přenosové charakteristiky jak ve frekvenční oblasti *Channel Transfer Function* (CTF), tak v oblasti časové *Channel Impulse Response* (CIR).

3.2.2 Analýza CSI ve frekvenční a časové oblasti

Odhad přenosového kanálu ve frekvenční oblasti lze definovat pomocí přenosové charakteristiky CTF označováno jako $H(f)$. Komplexní vyjádření přenosové funkce CTF viz rovnice (1.5). Přenosový kanál mezi vysílací a přijímací stranou lze definovat i v časové oblasti pomocí impulsové charakteristiky CIR označené jako $h(t)$.



Obr. 3.2: Vztah mezi CTF a CIR.

Rychlá Fourierova transformace (FFT) je algoritmus, pomocí kterého jsme schopni převést signál z časové do frekvenční oblasti [29]. Pro převod signálu z frekvenční oblasti do časové je nutné provést inverzní algoritmus IFFT, viz Obr. 3.2.

Koherentní šířka pásma a časové rozšíření kanálu

Koherentní šířka pásma souvisí s popisem přenosového kanálu ve frekvenční oblasti (CTF). Koherentní šířka pásma vyjadřuje, jak moc je přenos kanálu na sousedních kmitočtech korelovaný. Obvykle se používá normovaná korelace a koherentní šířka je vztažena k polovině její původní hodnoty. Časové rozšíření kanálu je naopak parametr, který se určuje v časové oblasti (CIR). V podstatě se jedná o rozdíl mezi časem příchodu poslední a první významné složky v přenosovém kanálu. Na základě těchto dvou údajů se dá určit, zdali je přenosový kanál frekvenčně selektivní.

$$B_c = \frac{1}{T_m}, \quad (3.1)$$

$$\frac{B_c}{B} \gg 1 \rightarrow \text{frekvenčně neselektivní}, \quad (3.2)$$

$$\frac{B_c}{B} \ll 1 \rightarrow \text{frekvenčně selektivní}, \quad (3.3)$$

kde B_c je koherentní šířka pásma (Hz), T_m časové rozšíření kanálu (s) a B celková šířka kanálu (Hz) [30].

Frekvenční selektivita je schopnost přijímače vybrat z celého spektra rádiových vln kmitočtové pásmo, které zabírá právě jeden vysílač. V podstatě jde o oddělení žádoucího od nežádoucího signálu na přijímací straně. Pokud jsou 2 harmonické kmitočty ve vzdálenosti větší než B_c , dochází k různému tlumení (kmitočty nejsou korelované). Pokud je tedy celková šířka pásma modulovaného signálu menší než B_c , je kanál frekvenčně neselektivní [30].

3.2.3 SNR

Signal-to-Noise Ratio (SNR) je poměr přijaté síly signálu k šumu a udává se v jednotkách dB. SNR lze definovat také jako rozdíl mezi výkonovou úrovní signálu a šumovým pozadím (*noise floor*). Hodnoty SNR se udávají v kladných číslech a podle této hodnoty se dá zjistit kvalita přijímaného signálu [26].

Tab. 3.1: Přehled hodnot SNR ve WLAN sítích [26].

SNR[dB]	poznámka
>40	excelentní signál
25 - 40	velmi dobrý signál
15 - 25	nízký signál
10 - 15	velmi nízký signál
<10	žádný signál

Nástroj CSI Tool 802.11n dokáže provádět měření kanálu o šířce 20 nebo 40 MHz. Efektivní SNR počítané pro jednotlivé subnosné je v úzkopásmových kanálech relativně přesné a jeví se jako subjektivně nejnázornější metrika v kombinaci s nástrojem CSI Tool pro odhad CTF a CIR. V praktické části této práce je tedy SNR zvoleno jako metrika pro popis signálu v přenosovém kanálu.

4 Měření kanálu v místnosti

Pro měření jsem využil jako vysílací stanici notebook HP EliteBook 8730W se zabudovanou Wi-Fi kartou INTEL 5300 NIC. Přístupovým bodem mi byl v tomto měření Wi-Fi router D-link DIR-818LW, který disponuje třemi anténami. Měření probíhalo pomocí výše popsaného nástroje CSI Tool 802.11n v operačním systému Linux. Pro grafické zobrazení výsledků měření bylo využito programu MATLAB, verze r2018a pro Linux.

4.1 Konfigurace routeru

V prvním kroku měření bylo nutné nastavení Wi-Fi routeru D-link DIR-818LW takovým způsobem, abychom mohli komunikovat s naší vysílací stanicí (HP 8730W). V Tab. 4.1 je uvedena konfigurace routeru.

Tab. 4.1: Konfigurace routeru D-link DIR-818LW.

router D-link DIR-818LW		
Frekvenční pásmo [GHz]	2,4	5
Jméno Wi-Fi (SSID)	CSI2	CSI5
povolené standardy	802.11n	802.11n
Zabezpečení	-	-
Šířka kanálu [MHz]	20	40
Přenosový mód	HT	HT

Z tabulky je zřejmé, že router DIR-818LW umí pracovat v kmitočtovém pásmu 2,4 i 5 GHz. Jméno přístupového bodu se volí libovolně. Mezi povolenými standardy může být pouze IEEE 802.11n a nesmí se využívat žádné zabezpečení přístupového bodu. Šířka kanálu může být 20 nebo 40 MHz a přenosový mód musí být nastaven jako HT tedy s vysokou propustností [4].

V době, kdy byla prováděna jednotlivá měření, byl přístupový bod DIR-818LW raději odpojen od internetu, aby byla zajištěna větší kontrola nad přenášenými daty.

4.2 Statické měření kanálu

Statické měření bylo provedeno pro dva měřicí scénáře. Pro přímou a nepřímou viditelnost mezi vysílací stanicí a přístupovým bodem. Měření proběhlo v pokoji panelového domu, kde šířka místnosti činí 3,5 m, délka 3,75 m a její výška 3 m. Místnost je obklopena betonovými nosnými zdmi. Stoly, dveře i postele jsou převážně ze dřeva a v místnosti se nachází tři okna.

V každém jednotlivém měření byly pomocí příkazu ping, který periodicky odesílá datové pakety a čeká na odezvu protistrany, zaznamenány CSI informace pro 100 paketů. Bral jsem v potaz pouze ty, které byly v rozmezí od paketu 30 po paket 60, protože v té době jsem v místnosti nebyl a signál nemohlo tedy nic ovlivnit. Těchto 30 paketů bylo analyzováno v programovém prostředí MATLAB.

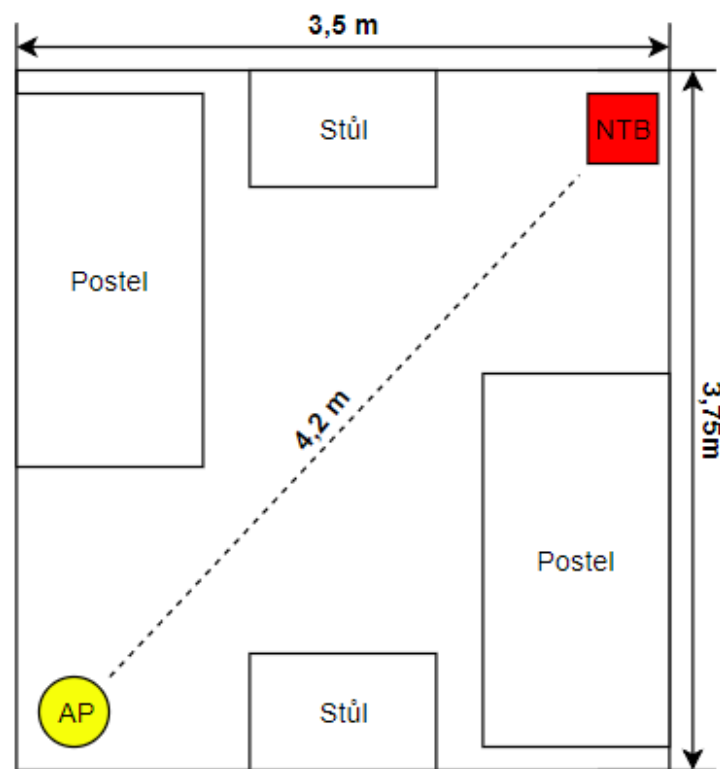
Měření byla prováděna jak ve frekvenčním pásmu ISM 2,4 GHz, tak i v ISM pásmu 5 GHz. V případě frekvenčního pásma ISM 5 GHz byla uvažována systémová šířka kanálu 40 MHz a jedna anténa pro vysílání a příjem signálu (SISO mód). Ve frekvenčním pásmu ISM 2,4 GHz byla uvažována systémová šířka kanálu 20 MHz. Signál byl v tomto případě vysílán jednou anténou a přijímán všemi 3 dostupnými anténami na přístupovém bodu (SIMO 1×3).

CSI informace byly zaznamenány vždy pro 100 paketů a byly využity ty, které nebyly ovlivněny přítomností osob v místnosti. CSI hodnoty byly dále zprůměrovány a z nich byly vytvořeny dva grafy, kde je vynášena závislost mezi indexem subnosné (horizontální osa) a SNR (vertikální osa).

Počet subnosných se liší v závislosti na použité šířce pásma, subnosné jsou v grafech indexovány od 0 do 30. Při využití 20 MHz pásma (64 subnosných) index subnosné nabývá přibližně dvou subnosných a při využití 40 MHz pásma (128 subnosných) přibližně čtyř subnosných [4].

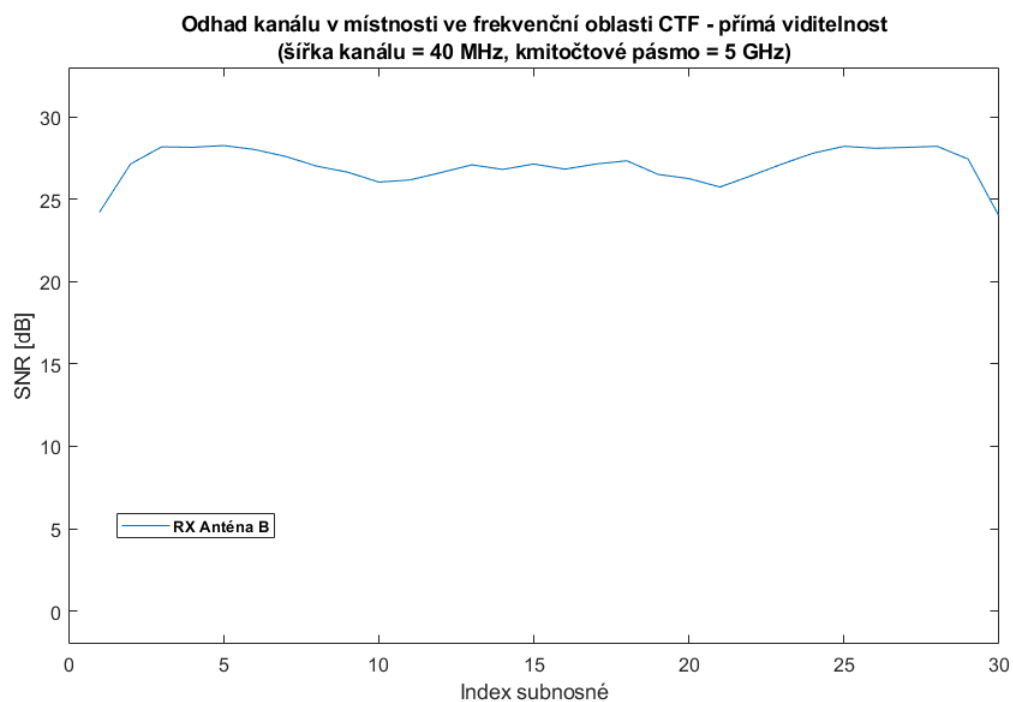
4.2.1 Měření při přímé viditelnosti

Vysílací stanice notebook HP 8730W byla umístěna do jednoho rohu místnosti a přístupový bod AP (DIR-818LW) do rohu protějšího. Vzdálenost mezi nimi byla 4,2 m a nenacházela se mezi nimi žádná překážka, viz Obr. 4.1.

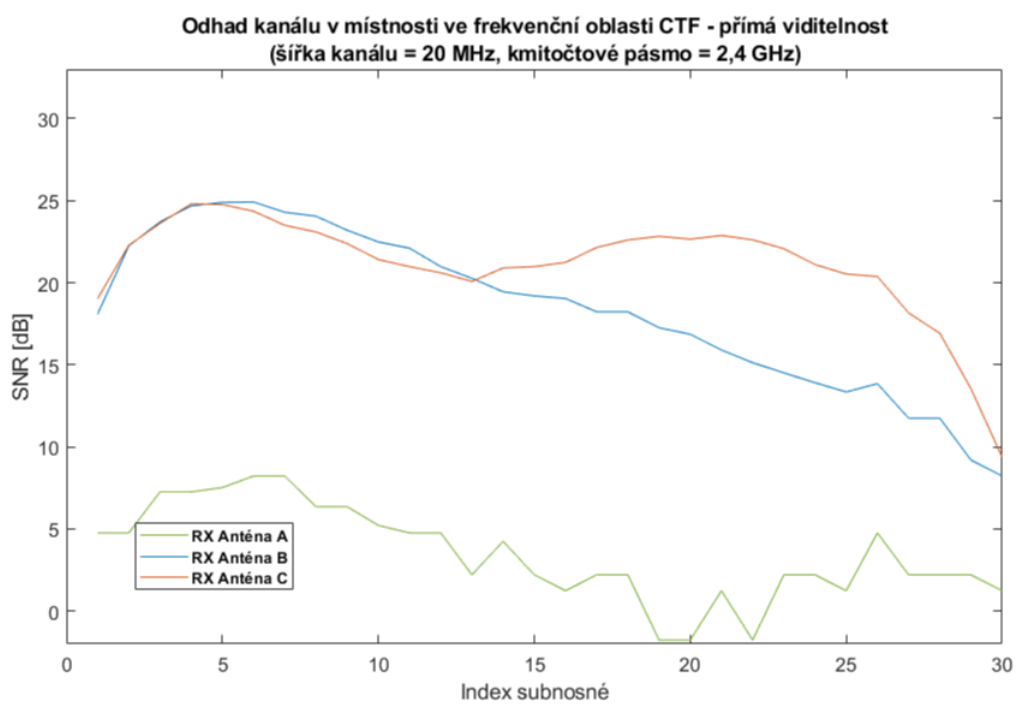


Obr. 4.1: Návrh měřicího scénáře pro přímou viditelnost.

Výsledky měření v místnosti pro přímou viditelnost jsou zobrazeny na Obr. 4.2 a Obr. 4.3. Hodnota SNR se na obou vynesných závislostech jeví poměrně stabilně, což odpovídá tomu, že nebylo využito překážky a cesta předpokládaného signálu byla přímá. Vzniklé útlumy jsou minimální a jsou dané geometrií místnosti. Při využití SISO (Obr. 4.2) technologie je hodnota SNR téměř konstantní, naopak při využití technologie SIMO (Obr. 4.3) se vzniklý útlum na anténě B kompenzuje nárustem hodnoty SNR na anténě C.



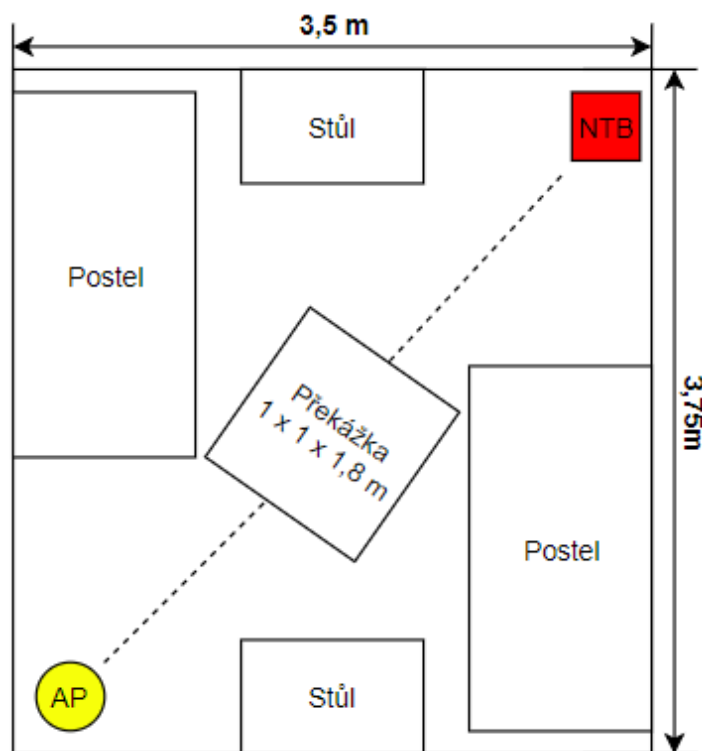
Obr. 4.2: Odhad kanálu v kmitočtovém pásmu 5 GHz - přímá viditelnost.



Obr. 4.3: Odhad kanálu v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz - přímá viditelnost.

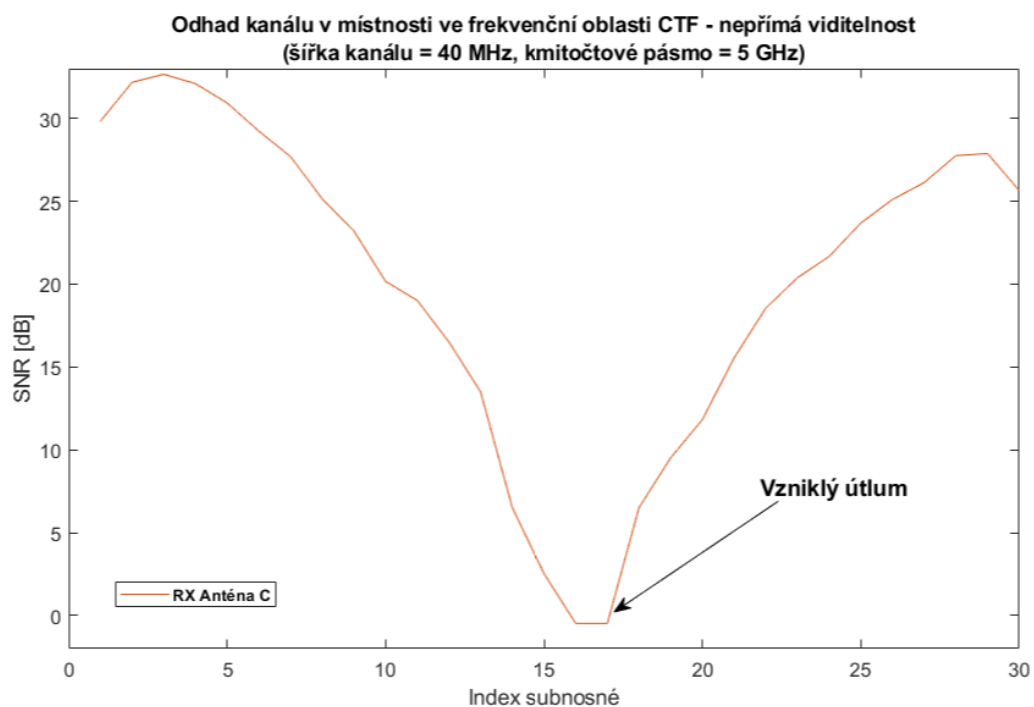
4.2.2 Měření při nepřímé viditelnosti

Umístění notebooku HP 8730W a přístupového bodu AP (DIR-818LW) je totožné jako při měření při přímé viditelnosti. Do předpokládané přímé cesty signálu byla umístěna dřevěná skříň o šířce 1 m a hloubce 1 m a výšce 1,8 m. Překážka byla umístěna přesně uprostřed mezi notebookem a AP, viz Obr. 4.4.

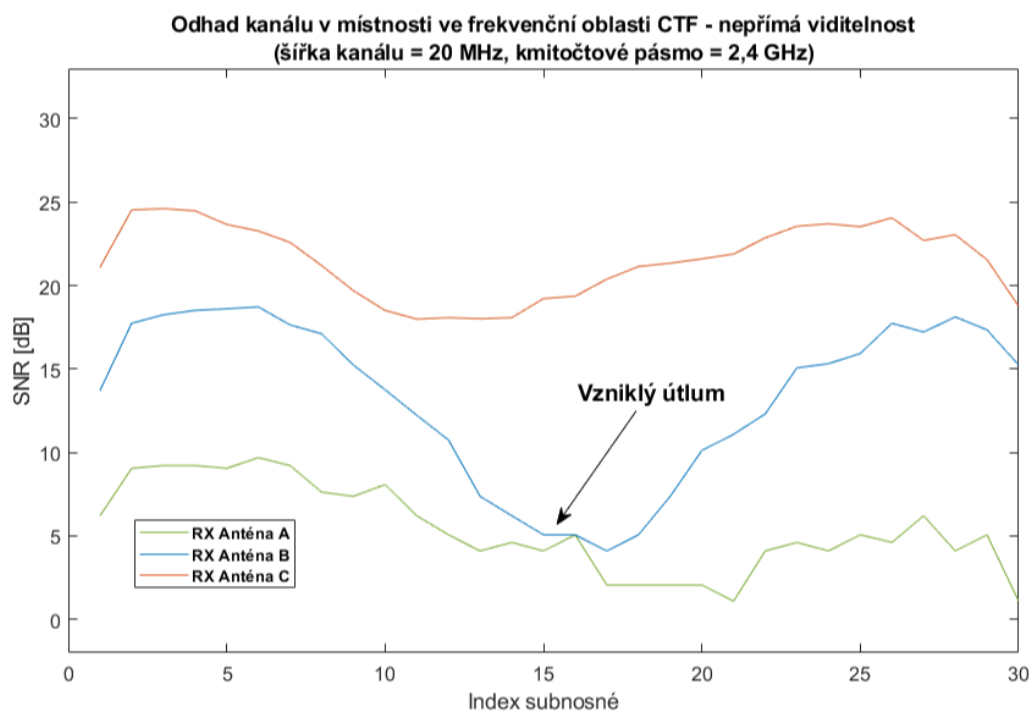


Obr. 4.4: Návrh měřicího scénáře pro nepřímou viditelnost.

Výsledky měření v místnosti pro nepřímou viditelnost jsou zobrazeny na Obr. 4.5 a Obr. 4.6. Vzniklý útlum zapříčiněný překážkou byl detekován pro oba odhadované kanály s nepřímou viditelností v okolí subnosné 15, což odpovídá umístění překážky přesně uprostřed mezi vysílací stanicí a přijímačem. U technologie SISO (Obr. 4.5) byl vzniklý útlum opravdu velký a na indexu subnosné 16 dosahoval hodnoty SNR až 0 dB. U technologie SIMO (Obr. 4.6) se vzniklý útlum projevil na anténě B, ale nebyl zde zaznamenán tak enormní únik jako u technologie SISO.



Obr. 4.5: Odhad kanálu v kmitočtovém pásmu 5 GHz - nepřímá viditelnost.



Obr. 4.6: Odhad kanálu v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz - nepřímá viditelnost.

4.2.3 Srovnání dosažených výsledků

Z grafů je zřejmé, že nástroj CSI Tool 802.11n je citlivý a dokáže zachytit změny v řádu jednotek metrů. Měření bylo několikrát opakováno a překvapivým zjištěním byla malá odchylka mezi jednotlivými měřeními.

Srovnání výsledků ve frekvenčním pásmu 5 GHz

V tomto frekvenčním pásmu byla využita šířka kanálu 40 MHz a systém SISO. Pro přímou viditelnost se hodnota SNR pohybovala od 26 do 28,3 dB. Pokles SNR byl zaznamenán zejména na indexu subnosné 10 a 20, ale jednalo se pouze o pokles zhruba 2 dB, což je opravdu minimální v kontextu ostatních měření. Pro nepřímou viditelnost se zde objevil velký pokles SNR na indexu subnosné 16. Pokles byl v okolí této oblasti natolik velký, že SNR dosahovalo hodnot menších než 10 dB, vyskytovalo se tu tedy pouze šumové pozadí.

Při přímé viditelnosti využil router pro příjem anténu B a při nepřímé viditelnosti anténu C. Síla přijímaného signálu na anténě B při přímé viditelnosti byla totožná se silou přijímaného signálu na anténě C při nepřímé viditelnosti. Při nepřímé viditelnosti bylo však využito větší hodnoty automatického zesílení zisku (AGC), a to asi o 10 dB [27]. Na přenosovou rychlost neměl zakrytý výhled žádný vliv.

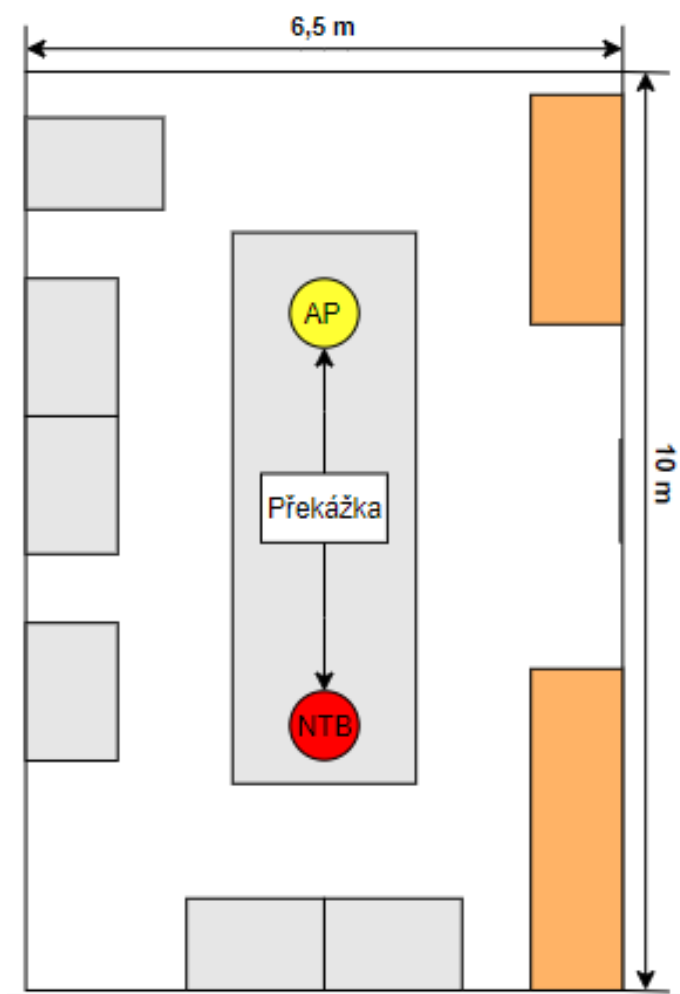
Srovnání výsledků ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz

Ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz byla využita šířka kanálu 20 MHz a systém SIMO, konkrétně jedna vysílací anténa a tři přijímací. Pro přímou i nepřímou viditelnost přijímala signál pouze anténa B a C. Anténa A dosahovala příliš nízkých hodnot a není ji třeba brát v úvahu. Je zřejmé, že abychom využili všechny tři přijímací antény, museli bychom použít i více antén vysílacích.

Pro měření s přímou viditelností byla linka ohledně kvality signálu poměrně konstantní. Antény A i C dosahovaly podobných hodnot a pohybovaly se v rozmezí 15 až 25 dB, pokud nebudeme brát v potaz pokles na posledních subnosných. Při nepřímé viditelnosti se anténa C chovala velmi podobně jako u přímé viditelnosti, dokonce byla i o něco stabilnější v příjmu signálu. Avšak anténa B již nebyla tak konstantní a v okolí indexu subnosné 15 bylo dosaženo hodnot SNR, kde žádný signál nepřijímá. Při nepřímé viditelnosti se opět využívalo větších hodnot zesílení zisku (AGC) a to v průměru o 8 dB [27]. Stejně jako u předchozího srovnání ve frekvenčním pásmu 5 GHz neměla nepřímá viditelnost žádný vliv na přenosovou rychlost.

4.3 Dynamické měření kanálu

Motivací pro návrh tohoto měřicího scénáře bylo otestovat nástroj CSI Tool 802.11n ve větší a z hlediska interiéru složitější místnosti. Výstup měření zkoumá mimo odhadu kanálu ve frekvenční oblasti CTF i výstup v oblasti časové CIR. Hrubě je tu zkoumána i frekvenční selektivita kanálu, s tím související koherentní šířka pásma a časové rozšíření kanálu. Odhad kanálu je zkoumán v závislosti na pohybu překážky, která je postavena do předpokládané přímé cesty signálu mezi vysílací a přijímací stanicí.



Obr. 4.7: Náskres rozměrů laboratoře SE7.107 a měřicího scénáře.

Dynamické měření přenosového kanálu bylo provedeno v laboratoři SE7.107, Ústav radioelektroniky, viz Obr. 4.7. Šířka místnosti činí 6,5 m, délka 10 m a výška 2,9 m. Zdi v laboratoři jsou betonové a nosné. Šedou barvou jsou vyznačeny stoly a oranžovou skříňe. V místnosti se nachází několik oken. Plánek místnosti uvedený

výše je spíše orientační, laboratoř je z hlediska interiéru velmi pestrá a na stolech se nachází několik měřicích zařízení. V době měření byl stůl uprostřed místnosti zcela vyklizen a byla na něm umístěna pouze vysílací stanice notebook HP 8730W a přístupový bod AP (DIR-818LW). Vzdálenost mezi nimi byla 4 m.

Odhad kanálu byl nejprve proveden pro přímou viditelnost, poté do předpokládané přímé cesty signálu byly umístěny kartonové krabice, které tvořily překážku o šířce 1 m, hloubce 0,8 m a výšce 1 m.

Obdobně jako u statického měření kanálu bylo využito příkazu ping a byly brány v potaz pouze CSI informace paketů, které nebyly ovlivněny přítomností pozorovatele v místnosti.

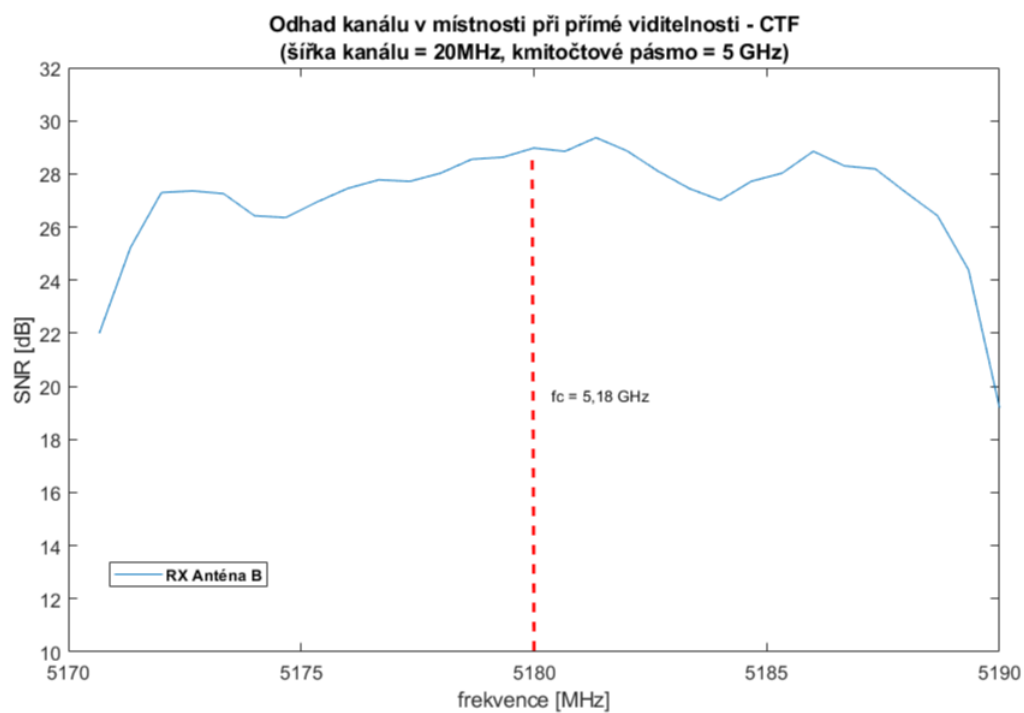
Měření bylo provedeno ve frekvenčním pásmu ISM 5 GHz a uvažovaná systémová šířka činila 20 MHz. Konkrétně se jednalo o Wi-Fi kanál 36, který má střední frekvenci 5,18 GHz [32]. Signál byl vysílán jednou anténou a přijímán také jednou anténou (SISO). Pro odhad kanálu ve frekvenční i časové oblasti byla využita veličina SNR.

4.3.1 Měření při přímé viditelnosti

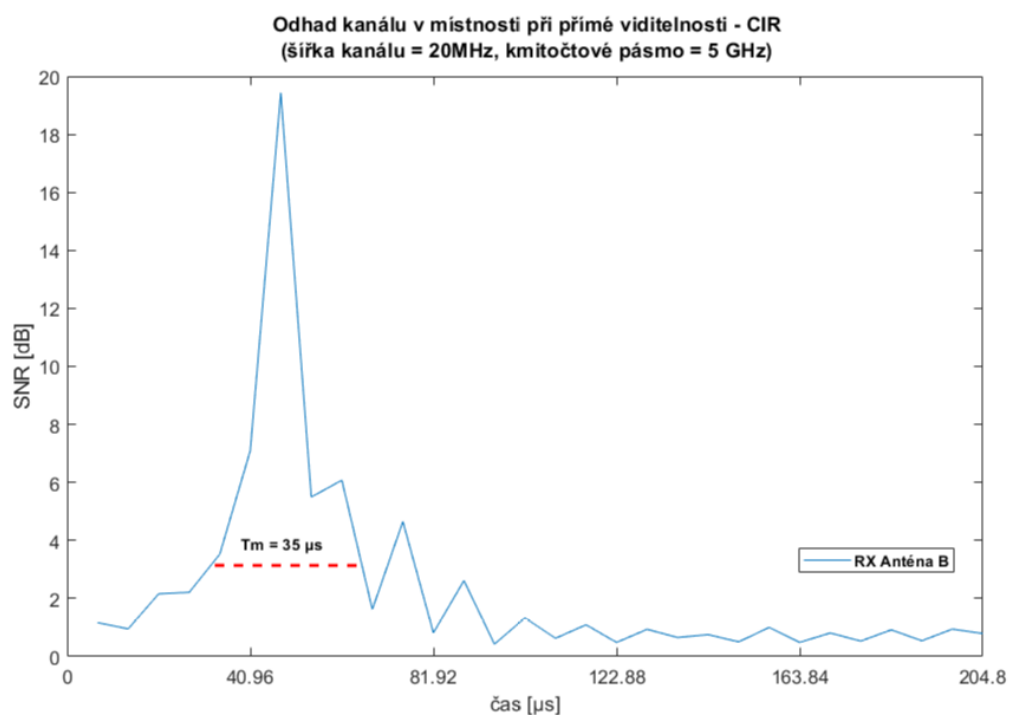
Nejprve se v laboratoři SE7.107 provedl odhad kanálu při přímé viditelnosti mezi vysílací stanicí notebookem HP 8730W a přístupovým bodem AP (DIR-818LW).

Pro přímou viditelnost byla také stanovena koherentní šířka pásma B_c a časové rozšíření kanálu T_m . Z těchto veličin se poté přibližně určila frekvenční selektivita proměřovaného přenosového kanálu.

Výsledky měření v laboratoři pro přímou viditelnost jsou zobrazeny na Obr. 4.8 a Obr. 4.9.



Obr. 4.8: Odhad kanálu CTF při přímé viditelnosti.



Obr. 4.9: Odhad kanálu CIR při přímé viditelnosti.

Pokud bychom neuvažovali úniky při měření přenosového kanálu na úplném začátku a jeho konci vynesené závislosti CTF byla hodnota SNR poměrně konstantní. Nabývala hodnot v rozmezí od 26,2 do 29,8 dB. Příjemci i vysílací antény se nachází za konstrukcí přijímače a vysílače. Nástroj občas i tuto samotnou konstrukci zaznamenává, a proto při některém měření zaznamenáváme určitý pokles na konci a začátku frekvenčního pásma. Příjem signálu byl proveden pomocí antény B.

Odhad přenosového kanálu je znázorněn i v časové oblasti CIR. Pro systémovou šířku pásma 20 MHz je ve frekvenční oblasti vzdálenost mezi jednotlivými subnosnými napevno daná a činí 312,5 kHz. Tato hodnota byla přepočtena do oblasti časové a doba trvání pro jednu subnosnou je poté 3,2 μ s. Vynásobením této hodnoty počtem subnosných obsažených ve frekvenčním pásmu (64) získáme dobu trvání všech subnosných obsažených v přenosovém kanálu [33]. Pomocí charakteristiky CIR byl proveden i hrubý odhad frekvenční selektivity přenosového kanálu.

Určení frekvenční selektivity

Pomocí vynesené závislosti bylo určeno časové rozšíření kanálu $T_m = 35 \mu$ s. Pochoitelně se jedná pouze o odhad hodnoty T_m , které bylo určeno za pomoci vynesené charakteristiky s omezením na prahovou hodnotu 3 dB, viz Obr. 4.9.

$$B_c = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{35 \cdot 10^{-6}} = 28,571 \text{ kHz}$$

$$\frac{B_c}{B} = \frac{28,571 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^6} = 1,4 \cdot 10^{-3}$$

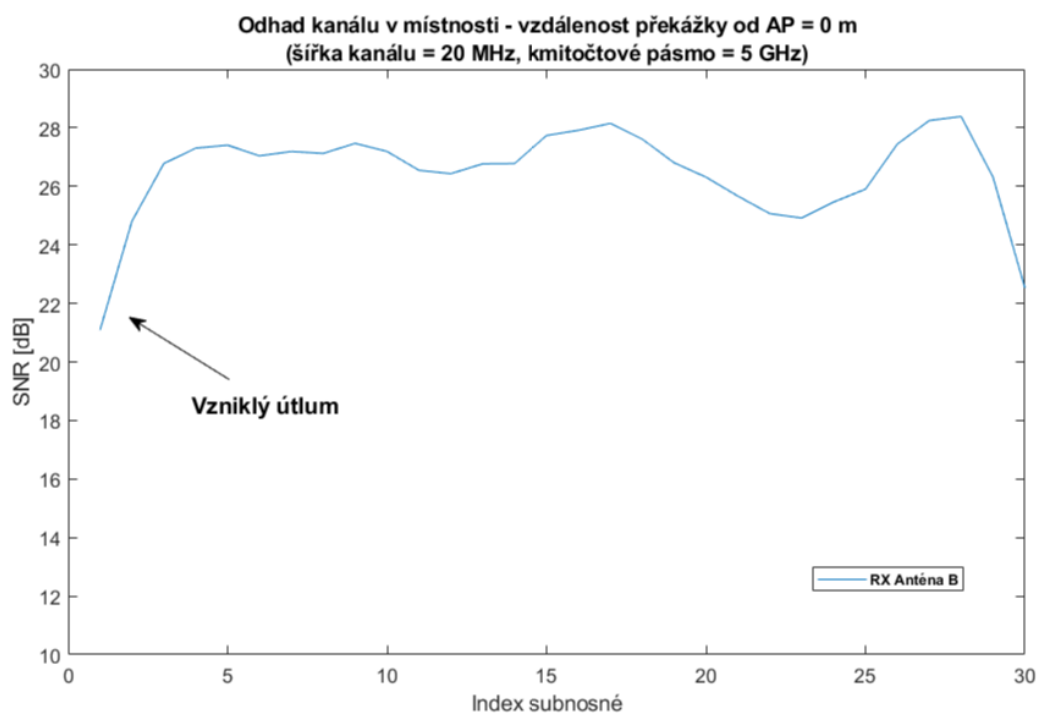
Poměr koherentní šířky pásma B_c a reálné šířky pásma B je o mnoho menší než 1 a je tedy splněna podmínka $\frac{B_c}{B} \ll 1$. Námi měřený přenosový kanál lze tedy označit za frekvenčně selektivní.

Námi odvozené hodnoty B_c a T_m jsou jen velmi orientační, a to vzhledem k tomu, že rozlišení, které námi využívaný nástroj CSI Tool 802.11n poskytuje, není dostatečně velké na to, abychom tyto parametry byli schopni určit přesně. Nástroj nepočítá hodnotu CSI pro každou subnosnou zvlášť, ale dává nám pouze matici 30 prvků skrz celý přenosový kanál, a proto počet vzorků k určení koherentní šířky pásma, ať už z časové či frekvenční oblasti, není dostačující.

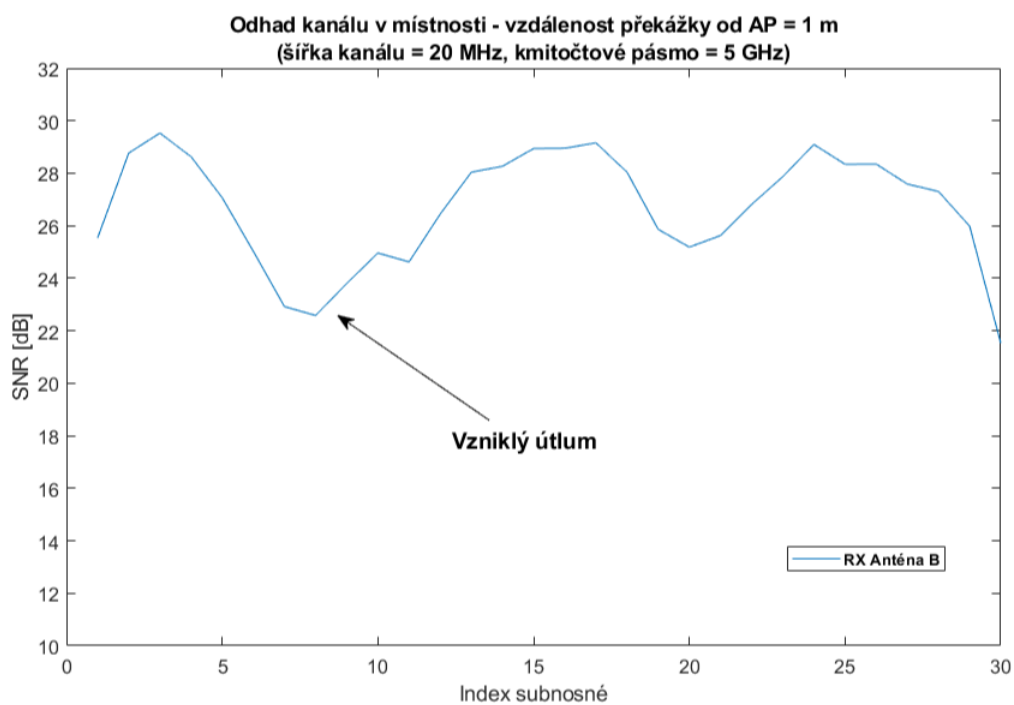
4.3.2 Měření s pohyblivou překážkou

Po proměření přenosového kanálu při přímé viditelnosti mezi vysílačem a přijímačem v laboratoři SE7.107 byla do předpokládané přenosové cesty signálu vložena překážka o šířce 1 m, hloubce 0,8 m a výšce 1 m. Překážka byla vytvořena z prázdných kartonových krabic.

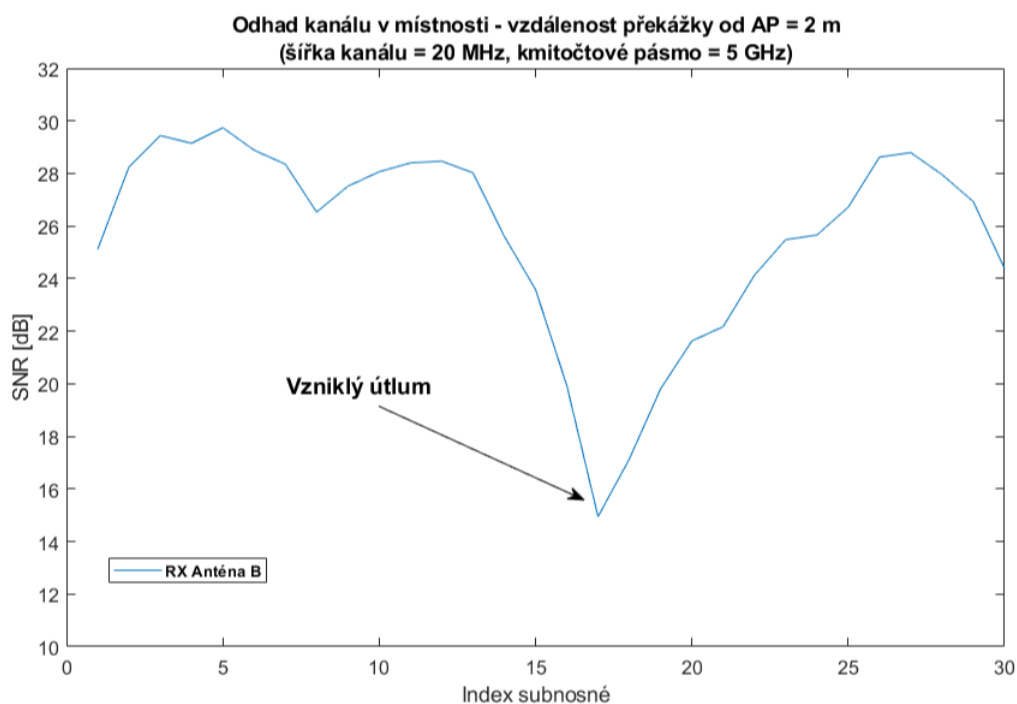
Překážkou se pohybovalo směrem od přijímače k vysílači. Odhad kanálu je graficky zobrazen ve frekvenční oblasti CTF, a to z důvodu detekování jednotlivých úniků v závislosti na poloze překážky. Měření proběhlo od vzdálenosti 0 m (překážka byla přitisknuta k přístupovému bodu) až po vzdálenost 4 m (překážka byla přitisknuta k vysílací stanici). Na základě několika experimentálních měření bylo zjištěno, že nástroj CSI Tool 802.11n přenosový kanál popisuje ze směru od přijímací strany směrem k vysílací, proto byla vzdálenost 0 m přiřazena umístění překážky u AP. Výsledky měření s pohyblivou překážkou jsou zobrazeny na Obr. 4.10 až Obr. 4.14.



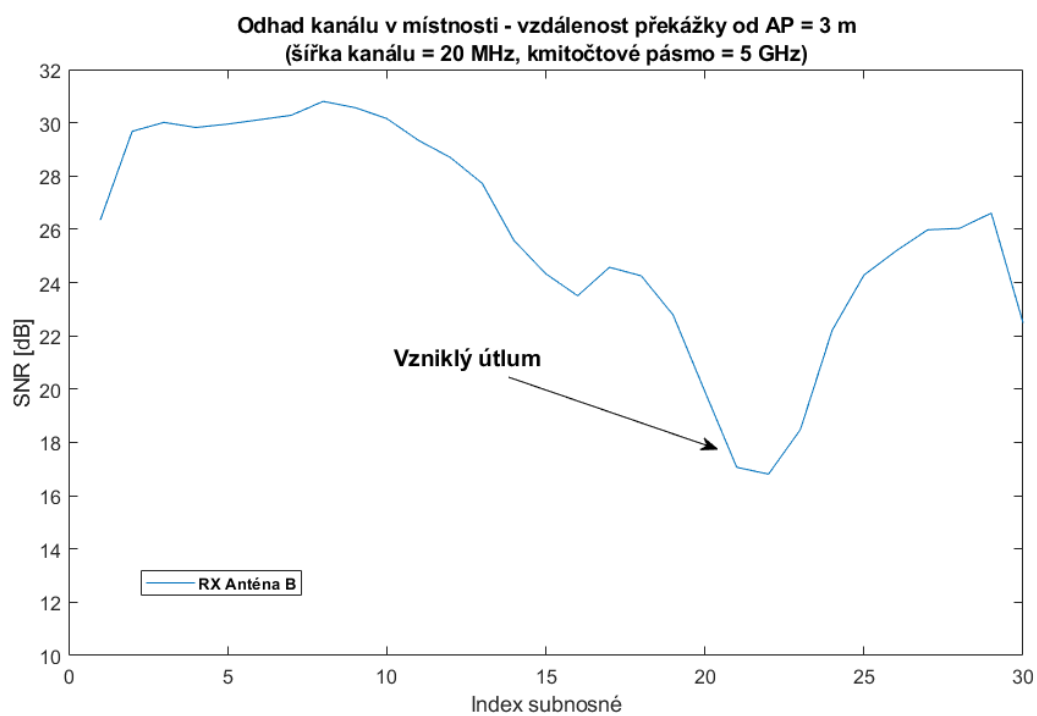
Obr. 4.10: Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 0 m.



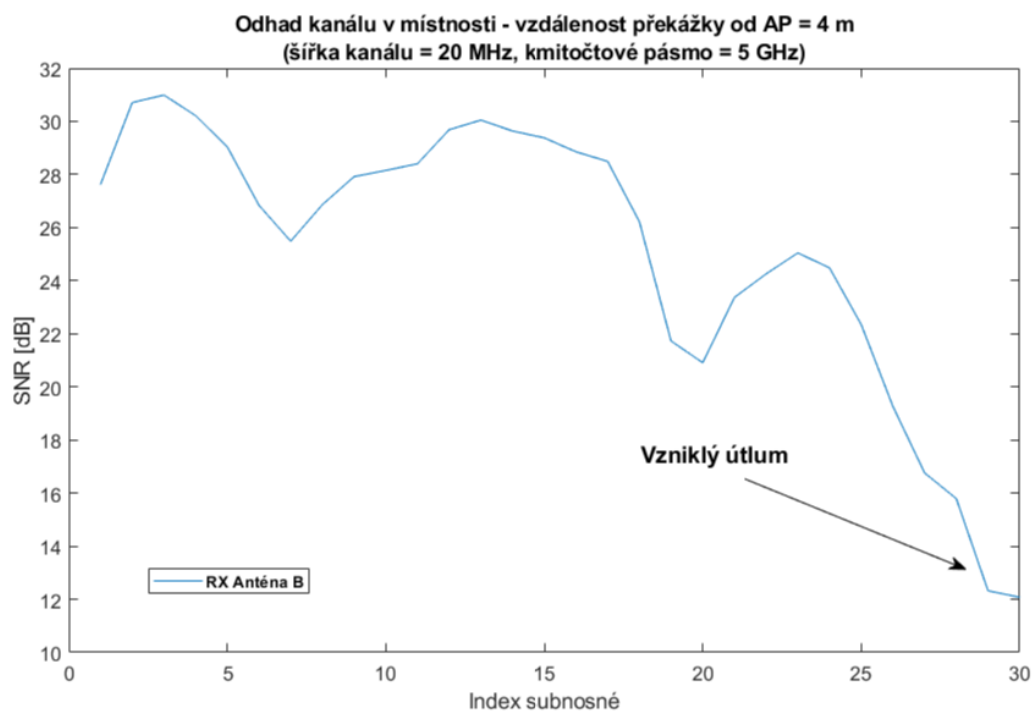
Obr. 4.11: Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 1 m.



Obr. 4.12: Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 2 m.



Obr. 4.13: Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 3 m.



Obr. 4.14: Odhad kanálu v místnosti při vzdálenosti překážky 4 m.

Ze zobrazených frekvenčních charakteristik je zřejmé, že pomocí nástroje CSI Tool 802.11n jsme schopni zaznamenat, kde se překážka na přenosové cestě nachází. Vzniklé útlumy nejsou tak velké jako například u statického měření. Překážka využitá při tomto měření byla menší a byla tvořena z prázdných krabic, které mají nižší útlum než dřevěná skříň.

V odhadu kanálu místnosti byl zachytáván nejen únik vzniklý v důsledku překážky, ale i únik signálu mezi indexem subnosné 20 a 25. Tento útlum hodnoty SNR byl nejspíše způsoben dataprojektorem připevněným ke stropu, který se objevoval na trase signálu mezi vysílací stanicí a AP.

Příjem signálu byl proveden anténou B. Zesílení zisku AGC, které probíhá na přijímací straně bylo vyšší než u měření při přímé viditelnosti, a to průměrně o 4 dB. Překážka neměla vliv na přenosovou rychlost.

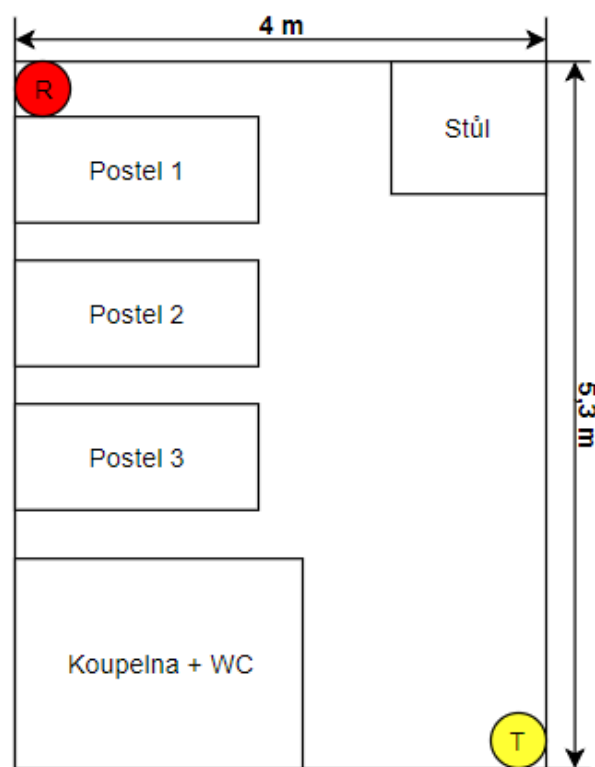
V tomto měření bylo dokázáno, že nástroj má při správné konfiguraci schopnost určit přesnou polohu objektu nacházejícího se v místnosti, a to v maximálním rozpětí jeden metr.

5 Možnosti využití v praxi

Nástroj CSI Tool 802.11n umožňuje čtení a analýzu kanálových měření. Pomocí tohoto nástroje jsme schopni provést odhad přenosového kanálu v sítích WLAN. Informace o signálu, který se vyskytuje mezi přijímačem a vysílačem, lze detailně analyzovat, a to zejména experimentálním způsobem. Využití odhadu kanálu WLAN má v reálném životě velký potenciál, zejména z pohledu monitorování lidské aktivity. Detekci objektů a lidského pohybu je možné využít ve velké škále aplikací pro nejrůznější prostředí [24].

5.1 Teoretický návrh medicínské aplikace

Informace o přenosovém kanálu lze využít i pro nejrůznější zdravotnické potřeby. Uvažujeme-li nemocniční pokoj s pacienty, je možné využít všudypřítomné Wi-Fi signály pro zachycení nejrůznější lidské aktivity. Pomocí informací o stavu kanálu (CSI) z fyzické vrstvy jsme schopni detekovat právě takové variace hodnot CSI, které jsou způsobené lidskou činností.



Obr. 5.1: Návrh nemocničního pokoje.

Měření přenosového kanálu je navrženo pro nemocniční pokoj, kde šířka místnosti činí 4 m, délka 5,3 m a výška 2,7 m. Zdi jsou betonové a interiér je převážně ze dřeva. V místnosti se nachází 3 okna. Umístění vysílače T (*transmitter*) je v pravém dolním rohu místnosti a přijímač R (*receiver*) v horním levém rohu místnosti, a to z důvodu pokrytí celé uzavřené oblasti. Vysílač i přijímač musí být připevněny ke zdi a nesmí s nimi být pohybováno, proto je vhodné je umístit co nejblíže k úrovni stropu.

Vysílač T představuje zařízení, které obsahuje síťovou kartu Wi-Fi INTEL 5300. Komunikuje s přijímačem R a CSI informace o této komunikaci odesílá v reálném čase na jiné zařízení (mimo místnost), které analyzuje a vyhodnocuje přenosový kanál [25]. Přijímač R slouží pouze jako přístupový bod (AP).

Čím menší místnost, tím jednodušeji a přesněji je možno s odhadem kanálu pracovat. Předpokladem pro jednodušší analýzu je tedy místnost s menšími rozměry a nízkým počtem překážek. Veškerý interiér by ideálně měl být nepohyblivý, aby úniky vzniklé v odhadu přenosového kanálu vznikaly pouze v důsledku lidského pohybu.

5.1.1 Možnosti navrhnutého scénáře

Nástroj CSI Tool 802.11n má spíše experimentální charakter, a proto je nutné provést, před samotným uvedením do provozu, mnoho testů. Nejprve se musí stanovit odhad přenosového kanálu v místnosti bez pacientů a dalších rušivých elementů. Je třeba provést velké spektrum nejrůznějších simulací lidského pohybu. Najít mezi různou lidskou aktivitou a úniky v signálu souvislosti a vyhodnocovat je.

Nástroj je schopný zachytávat nejen náhlé a větší změny, jako je například pád pacienta, ale i ty nejmenší změny v řádu centimetrů [31]. V praktické části jsme si ukázali, že lze pomocí nástroje určit, kde se objekt na přenosové cestě nachází. Na přenosovém kanále by se tedy mohla zkoumat ta část, kde se nachází tři postele a jelikož jsme schopni zachytávat opravdu změny v řádech centimetrů, je možné, že bychom mohli snímat například i tlukot srdce, případně dýchání pacienta.

Pochopitelně signály nelze považovat za neměnnou veličinu a veškeré aplikace vytvořené na základě tohoto nástroje fungují jen s určitou pravděpodobností a nejsou stoprocentní. I přesto je však škála využití obrovská, nejen z hlediska medicínských aplikací [24].

6 Závěr

V bakalářské práci jsem se nejprve věnoval bezdrátovému komunikačnímu standardu IEEE 802.11, kde jsem krátce popsal již vydané standardy a jejich modulační techniky. Více jsem se zaměřil na standard IEEE 802.11n, ten totiž využívá síťová karta Wi-Fi INTEL 5300 NIC, kterou jsem používal v měření. Určitou pozornost jsem věnoval i samotnému šíření vln uvnitř budov, kde jsem se zaměřil i na popis signálu v přenosovém kanálu.

Dále jsem se seznámil s vlastnostmi a použitím již zmiňované Wi-Fi karty INTEL 5300 NIC a dostupného nástroje 802.11n CSI Tool. Nutné bylo také seznámení s operačním systémem Linux na kterém je tento nástroj dostupný.

Provedl jsem měření kanálu v uzavřené místnosti panelového bytu prostřednictvím Wi-Fi karty INTEL 5300 NIC. Vytvořil jsem dva měřicí scénáře, kde jsem využíval jako vysílací stanici notebook HP 8730W a přístupový bod D-Link DIR-818LW. Tato zařízení byla umístěna naproti sobě v rozích místnosti. První měření proběhlo s přímou viditelností těchto zařízení a v druhém měření jsem viditelnost zakryl skříní. Měření kanálu proběhlo v kmitočtovém pásmu 2,4 i 5 GHz.

Další měření jsem provedl pro větší a z hlediska interiéru složitější místnost. Pro navrhnuté měřicí scénáře jsem využil obdobnou vysílací stanici i přístupový bod. Zařízení byla umístěna uprostřed místnosti naproti sobě. Měření přenosového kanálu proběhlo v kmitočtovém pásmu ISM 5 GHz. Nejprve byl proměřen přenosový kanál při přímé viditelnosti, kde jsem mimo zkoumání přenosového kanálu ve frekvenční oblasti CTF provedl odhad kanálu i v oblasti časové CIR. Byla tu zkoumána i frekvenční selektivita přenosového kanálu. V druhém měření bylo využito překážky, kterou bylo pohybováno směrem od AP k vysílací stanici. Ukázalo se, že na základě detekce úniků způsobenými překážkou, lze s rozpětím asi jeden metr určit i její polohu v místnosti.

Při proměřování frekvenční selektivity přenosového kanálu se ukázalo, že nástroj 802.11n CSI Tool neposkytuje dostatečný počet vzorků k určení parametrů koherentní šířky pásma a časového rozšíření kanálu. Nelze tedy například porovnávat selektivitu kanálu při přímé a nepřímé viditelnosti, jelikož rozlišení nástroje není dostatečně velké k tomu, aby dokázalo zachytit změny těchto parametrů v přenosovém kanálu.

Nástroj CSI Tool 802.11n je možné využít pro nespočet aplikací v nejrůznějších prostředích. Mohou to být mimo jiné i aplikace medicínského charakteru. Otázka medicínské aplikace byla zvažována na závěr této práce a byl proveden její hrubý

návrh a možnosti jejího využití. Pro její realizaci je však nutno provést mnoho měření a testů k odhalení možné chybovosti.

Literatura

- [1] Large-Scale Wireless LAN Design [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: <https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/papers802.11/lswlan.pdf>. Carnegie Mellon University. Vedoucí práce Alex Hills.
- [2] DOCTOROW, Cory. WiFi isn't short for "Wireless Fidelity". Boing Boing [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: <https://boingboing.net/2005/11/08/wifi-isnt-short-for.html>
- [3] IEEE 802.11. Wikipedia [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- [4] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [online]. In: . New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, s. 2793 [cit. 2018-11-30]. ISBN 978-0-7381-7245-3 STDPD97218. Dostupné z: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.11-2012.pdf>
- [5] KARINGATTIL, Raju, Louis WILLIAMS a Matthew LOY. ISM - Band and Shor Range Device Regulatory Compliance Overview [online]. In: . s. 17 [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/swra048/swra048.pdf>
- [6] Český telekomunikační úřad. Wikipedia [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cesk%C3%BD_telekomunika%C4%8Dn%C3%AD_%C3%BA%C5%99ad
- [7] EU Compliance Information. Cisco Meraki Documentation [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: https://documentation.meraki.com/MR/Radio_Settings/EU_Compliance_Information
- [8] FRENZEL, Lou. What's the Difference Between IEEE 802.11ah and 802.11af in the IoT?. Electronic Design [online]. 2017, , 1 [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/industrial-automation/what-s-difference-between-ieee-80211ah-and-80211af-iot>
- [9] Free Space Loss [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Free_Space_Loss.pdf
- [10] HANUS, Stanislav. Nové technologie mobilních komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO [online]. BRNO, 2013 [cit. 2018-11-30].

- Dostupné z: <https://vut-vsb.cz/home/get-file?file=422&%3Bportal=Portal2.VUT-Fakultaelektrotechnikyakomunikačnichtechnologií>.
- [11] HANUS, Stanislav. Bezdrátové mobilní komunikace - přednášky. 2012. Vysoké učení technické v Brně.
 - [12] RINE, Jukka. Basics of OFDM [online]. Tampere [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: http://www.cs.tut.fi/kurssit/TLT-9707/presentations/ofdm_basics.pdf. TampereUniversityofTechnology.
 - [13] 802.11n Wireless Technology Overview [online]. In: . s. 7 [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: <http://www.ventevinfra.com/pdf/802.11n%20Wireless%20Technology%20verview.pdf>
 - [14] NORDIIN, Brandon A. Certified Wireless Analysis Professional [online]. 1. Emeryville, s. 452 [cit. 2018-11-30]. ISBN 0-07-225585-4. Dostupné z: https://www.cwnp.com/wp-content/uploads/pdf/CWAP_WLAN_ANALYSIS.pdf
 - [15] KOCUR, Z. a M. ŠAFRÁNEK. Fyzická vrstva Wi-Fi. [Http://access.feld.cvut.cz](http://access.feld.cvut.cz) [online]. Praha, 2008 [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008050006>
 - [16] 802.11n Signal Structure. Keysight technologies [online]. [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/n7617a/mimo_ofdm_signal_structure.htm
 - [17] PHIFER, Lisa. What is 802.11n Greenfield mode used for. TechTarget [online]. 2008 [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://searchnetworking.techtarget.com/answer/What-is-80211n-Greenfield-mode-used-for>
 - [18] NOVOTNÝ, K., Elektromagnetické pole a vlny, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2001
 - [19] PECHAČ, Pavel. Šíření vln v zástavbě. 2005. Praha, 2005. ISBN 80-7300-186-1.
 - [20] ČESKÁ REPUBLIKA. Plán přidělení kmitočtových pásem. In: 423. Praha, ročník 2017, částka 150, 105/2010. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/539/soubory/narodnikmitoctovatabulka.pdf>
 - [21] MAZÁNEK, M., Pechač, P., Šíření elektromagnetických vln a antény, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004

- [22] ALJUMAILY, Mustafa. A survey on WiFi Channel State Information (CSI) utilization in Human Activity Recognition [online]. Knoxville [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305722198_A_survey_on_WiFi_Channel_State_Information_CSI_utilization_in_Human_Activity_Recognition.TheUniversityofTennessee.
- [23] HALPERIN, Daniel, Wenjun HU, Anmol SHETH a Davit WETHERALL. Tool release: Gathering 802.11n Traces with ChannelState Information. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. vol. 41, no. 1, pp. 53-53, 2011. ISSN:01464833
- [24] HALPERIN, Daniel, Wenjun HU, Anmol SHETH a Davit WETHERALL. Linux 802.11n CSI Tool [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://dhalperi.github.io/linux-80211n-csitool>
- [25] GONG, L. Yang, W. Man, D. Dong, G. Yu, M. Lv, J. WiFi-Based Real-Time Calibration-Free Passive Human Motion Detection. Sensors 2015, 15, 32213-32229
- [26] GEIER, Jim. How to: Define Minimum SNR Values for Signal Coverage [online]. In: . [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: http://www.wireless-nets.com/resources/tutorials/define_SNR_values.htm
- [27] SINGERL, Peter a Christian VOGEL. A FAST AND ACCURATE AUTOMATIC GAIN CONTROL FOR A WIRELESS LOCAL AREA NETWORK RECEIVER [online]. In: . s. 5 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/1490/69c14830cbf0b35c5ea11290a5e09e56e4b5.pdf>
- [28] KUMAR, Sanjiv, Pradeep Singh GUPTA a Ghanshyam SINGH. Performance Analysis of Rayleigh and Rician Fading Channel Models using Matlab Simulation [online]. India, 2013, 9 s. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/2a68/770085aa366a939f6c888ddbba6e8756da08.pdf>
- [29] OBERST, Ulrich. THE FAST FOURIER TRANSFORM. SIAM Journal on Control and Optimization. 2007, 45.
- [30] MARŠÁLEK, Roman. TEORIE RÁDIOVÉ KOMUNIKACE. Brno, 2012, 144 s. ISBN 978-80-214-4503-1. Vysoké učení technické v Brně.
- [31] ZHANG, D., H. Wang and D. Wu, "Toward Centimeter-Scale Human Activity Sensing with Wi-Fi Signals,"in Computer, vol. 50, no. 1, pp. 48-57, Jan. 2017. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7807197&isnumber=7807153>

- [32] List of WLAN channels [online]. 2017 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://ipfs.io/ipfs/QmXoybizjW3WknFiJnKLwHCnL72vedxjQkDDP1mXWo6uco/wiki/List_of_WLAN_channels.html
- [33] PHY Basics: How OFDM Subcarriers Work [online]. In: . 2015 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work>

Seznam zkratek

AP	Access point
AGC	Automatic gain control
BER	bitová chybovost – Bit Error Ratio
CCA	Clear Channel Assessment
CSI	Channel State Information
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
DHSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIRP	ekvivalentní izotropně vyzářený výkon - Equivalent Isotropically Radiated Power
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSPL	útlum volného prostoru - Free-Space Path Loss
GI	Guard Interval
HEW	High-Efficiency Wireless
HT	High-throughput
ICI	Inter Carrier Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISI	Inter Symbol Interference
ISM	Industrial, Scientific, Medical
LAN	Local Area Network
LTF	Long Training Field
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NIC	Network Interface Controller
Nrx	počet přijímacích antén - Number of receiver antennas
Ntx	počet vysílacích antén - Number of the transmit antennas
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PHY	fyzická vrstva - Physical layer
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure
PMD	Physical Medium Dependent
PPDU	PLCP Protocol Data Unit
PSDU	PLCP Service Data Unit PSDU
R	přijímač - receiver
RSSI	Received Signal Strength Indication
SC	Single Carrier
SIG	Signal Field

SIMO	Single-Input Multiple-Output
SISO	Single-Input Single-Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SSID	Service Set Identifier
STF	Short Training Field
T	vysílač - transmitter
WLAN	Wireless Local Area Network

A Příloha

A.1 Definice matice CSI pro IEEE 802.11

Table 8-43—CSI Report field (20 MHz)

Field	Size (bits)	Meaning
SNR in receive chain 1	8	Signal-to-noise ratio in the first receive chain of the STA sending the report.
...		
SNR in receive chain N_r	8	Signal-to-noise ratio in the N_r 'th receive chain of the STA sending the report.
CSI Matrix for carrier -28	$3+2 \times N_b \times N_c \times N_r$	CSI matrix (see Figure 8-63)
CSI Matrix for carrier -1	$3+2 \times N_b \times N_c \times N_r$	CSI matrix
CSI Matrix for carrier 1	$3+2 \times N_b \times N_c \times N_r$	CSI matrix
...		
CSI Matrix for carrier 28	$3+2 \times N_b \times N_c \times N_r$	CSI matrix

Obr. A.1: Matice CSI pro systémovou šířku pásma 20 MHz [4].

Table 8-44—CSI Report field (40 MHz)

Field	Size (bits)	Meaning
SNR in receive chain 1	8	Signal-to-noise ratio in the first receive chain of the STA sending the report.
...		
SNR in receive chain N_r	8	Signal-to-noise ratio in the N_r 'th receive chain of the STA sending the report.
CSI Matrix for carrier -58	$3+2 \times N_b \times N_c \times N_r$	CSI matrix (see Figure 8-63)
...		
CSI Matrix for carrier -2	$3+2 \times N_b \times N_c \times N_r$	CSI matrix
CSI Matrix for carrier 2	$3+2 \times N_b \times N_c \times N_r$	CSI matrix
...		
CSI Matrix for carrier 58	$3+2 \times N_b \times N_c \times N_r$	CSI matrix

Obr. A.2: Matice CSI pro systémovou šířku pásma 40 MHz [4].